



# 中国燃煤机组用水效率评估 及用水定额提标效果分析

Assessment on the water efficiency of coal-fired power generating units in China and the effect of strengthening water withdrawal quotas

同济大学

2020 年 9 月

## 摘要

燃煤发电是我国主力电源，2018年贡献了全国发电量总量的64%。燃煤发电过程用水量大。据测算，2015年燃煤发电淡水取水量约占全国取水总量的9%，是仅次于农业灌溉的第二大用水部门。在“西电东输”能源发展战略的驱动下，煤电布局不断西移，约三分之二的燃煤发电量位于高和极高水压力地区，水资源与电力生产的空间错配加剧了西北等缺水地区的水资源压力。面对上述情况，我国出台了一系列管理制度和政策促进电力工业节水管理，其中，用水定额是基础性的节水政策。由于我国煤电工业正处于快速的结构调整和技术进步过程中，燃煤发电用水效率不断提升，必须阶段性地更新用水定额，以跟上技术进步的步伐，切实指导缺水地区开展节水工作。为此，2019年12月水利部印发了18项新的工业用水定额（水节约〔2019〕373号），对原定额进行了提标，并首次设定通用值、先进值和领跑值三级指标体系，促进分类对标管理。

本报告首先分析了我国煤电工业国家和地方用水定额的修编历史和特点；然后基于全国火电机组能效水平对标竞赛中报告的大中型燃煤机组用水数据，采用多元回归模型评估了燃煤机组的用水效率及其影响因素；最后，估算了落实新版火电工业用水定额的预期节水量及其货币化节水收益。结果表明，用水定额标准的地区差异性不强，绝大多数地方标准直接采用了国家标准的定额数值，难以体现实际用水效率的地区差异。近年来，我国燃煤机组用水效率显著提升，约90%的现役机组可以满足2012年版原国家定额标准，由此可见提标政策是适时的、可行的。假定所有大中型燃煤机组均达到提标后用水定额的通用值，则现役机组可实现节水总量1.22亿m<sup>3</sup>。在最严格的执行情景下，假定水资源稀缺的三北地区达到用水定额领跑值、其他地区达到先进值，节水潜力可达8.23亿m<sup>3</sup>。在浙江、内蒙古、河南、河北、山西、甘肃、新疆等7个节水潜力大、水资源压力大的重点省区，按当地水资源税率和工业用水价格测算的货币化节水收益总额分别为1.48亿元和17.8亿元；如果采用模糊综合评估方法，考虑水资源的多元社会经济价值，则节水收益总额可达27亿元。

为加强煤电工业的水资源管理，本报告提出以下4点政策建议：（1）统一燃煤机组水资源管理工作中使用的指标术语、核算方法和核算口径；（2）完善燃煤电厂用水监测体系，建立数据采集、分析和报告网络；（3）根据不同地区的水资源禀赋和技术条件，制定差异化的地方标准；（4）强制性措施与激励性措施相结合，提高企业节水改造积极性和主动性。

**引用建议：**张超，李佳雯. 中国燃煤机组用水效率评估及用水定额指标效果分析. 2020. 能源基金会赠款项目技术报告, G-1906-29810.

## 目 录

<b>1 引言</b>	<b>1</b>
<b>2 燃煤机组用水方式</b>	<b>4</b>
2.1 燃煤机组主要用水环节及用水指标界定	4
2.2 燃煤机组冷却技术类型及特点	5
<b>3 燃煤机组用水（取水）定额政策现状分析</b>	<b>7</b>
3.1 用水定额在火电水资源管理中的作用	7
3.2 国家层面火电用水（取水）定额标准修编	8
3.3 火电用水（取水）定额地方标准比较分析	10
3.3.1 地方标准概览	10
3.3.2 用水（取水）定额地区差异比较	12
<b>4.中国大中型燃煤机组用水效率评价</b>	<b>16</b>
4.1 数据说明	16
4.2 机组用水效率评价	18
4.2.1 单位发电用水量整体变化	18
4.2.2 直流冷却机组用水效率评价	19
4.2.3 循环冷却机组用水效率评价	21
4.2.4 空气冷却机组用水效率评价	23
4.3 燃煤机组单位发电用水量多元回归分析	25
<b>5.燃煤机组用水定额指标效果分析</b>	<b>27</b>
5.1 估算数据和方法	27
5.2 节水总量计算结果	31
5.3 分区域计算结果	33
<b>6. 用水定额指标的节水量价值评估</b>	<b>36</b>
6.1 水资源价值模糊综合评估模型	36
6.2 评价指标与数据来源	39
6.3 分省计算结果分析	41
<b>7.结论与建议</b>	<b>42</b>

## 图目录

图 1. 研究技术路线图 .....	3
图 2. 2000-2017 年地方用水 (取水) 定额更新频次 .....	10
图 3. 2000-2017 年每年更新省份个数 .....	11
图 4. 直流冷却机组用水 (取水) 定额地方标准比较 .....	14
图 5. 循环冷却机组用水 (取水) 定额地方标准比较 .....	14
图 6. 空气冷却机组用水 (取水) 定额地方标准比较 .....	15
图 7. 对标数据覆盖率 .....	16
图 8. 2017 年对标机组冷却技术空间分布 .....	17
图 9. 2013-2017 年分冷却技术、分机组容量单位发电用水量变化 .....	18
图 10. 2017 年 300MW 级直流冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	20
图 11. 2017 年 600MW 级直流冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	20
图 12. 2017 年 300MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	21
图 13. 2017 年 600MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	22
图 14. 我国北方地区不同水源类型的循环冷却机组用水效率评价 .....	22
图 15. 2017 年 300MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量空间分布 .....	23
图 16. 2017 年 300MW 级空气冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	24
图 17. 2017 年 600MW 级空气冷却样本机组单位发电用水量频数分布 .....	24
图 18. 不同标准下超标机组比例 .....	31
图 19. 2020 年不同情景下采用新标准的全国燃煤机组节水潜力 .....	32
图 20. 差异化情景下区分装机容量、所用水源的各类循环冷却机组节水量 .....	33
图 21. 差异化情景下各区域不同类型机组节水量 .....	34
图 22. 差异化情景下分省区水压力、节水潜力象限图 .....	34
图 23. 三种货币化的水资源价值模式下的节水效益比较 .....	41
图 24. 直流冷却示意图 .....	48
图 25. 循环冷却示意图 .....	49
图 26. 空气冷却 (间接空冷) 示意图 .....	50

## 表目录

表 1. 三类冷却技术特点比较.....	6
表 2. 《GB/T 18820-2002》单位发电量取水量定额指标 ( $m^3/MWh$ ) .....	8
表 3. 《GB/T 18820-2002》单位装机容量取水量定额指标 ( $m^3/s\cdot GW$ ) .....	8
表 4. 《GB/T 18916.1-2012》单位发电量取水量定额指标 ( $m^3/MWh$ ) .....	8
表 5. 《GB/T 18916.1-2012》单位装机容量取水量定额指标 ( $m^3/s\cdot GW$ ) .....	8
表 6. 水节约〔2019〕373号火力发电机组用水定额 ( $m^3/MWh$ ) .....	9
表 7. 各省自治区用水(取水)定额地方标准划分方式比较.....	12
表 8. 地方标准高于国家标准的情况汇总 ( $m^3/MWh$ ) .....	15
表 9. 多元回归模型参数估计结果.....	26
表 10. 不同类型燃煤机组单位发电用水量均值.....	27
表 11. 2020燃煤机组装机容量和发电量估算.....	29
表 12. 节水潜力计算情景设计 .....	30
表 13. 水资源评价指标体系 .....	39

## 1 引言

燃煤发电是我国主力电源。截至 2018 年底，我国煤电装机容量达到 1008GW<sup>[1]</sup>，占全国发电装机总量的 53%，并且已经超过全球现役煤电装机总量的一半。2018 年燃煤发电量 4.5 万亿千瓦时，贡献了全国发电量总量的 64%<sup>[1]</sup>。在电力工业低碳化发展的背景下，煤电在电源结构中的比重呈不断下降趋势。不过，我国一次能源禀赋的特点决定了煤炭清洁高效利用是我国能源安全的关键保障，在未来相当长的时期内，燃煤发电仍将作为最主要的电源类型支撑社会经济发展和电力消费增长。

以蒸汽循环为基本原理的燃煤发电过程用水量大，水资源主要用于冷却凝汽器，带走废热，此外锅炉补水、烟气脱硫、辅机冷却、除尘、排渣等众多工艺环节都需要消耗水。据研究测算<sup>[2]</sup>，2015 年我国燃煤发电淡水取水总量约 560 亿立方米，相当于当年全国取水总量的 9%<sup>[3]</sup>，是继农业灌溉之后用水量第二大的单一产业部门。除淡水外，沿海地区大量海水冷却燃煤电厂取用海水量约 530 亿立方米，占我国海水直接利用量的近一半<sup>[4]</sup>。

燃煤发电对水的依赖使不断扩张的煤电工业成为稀缺水资源的有力竞争者，特别是在“西电东输”能源发展战略驱动下，新建煤电机组向西部缺水地区转移的趋势十分明显<sup>[5]</sup>。水资源和煤炭资源在空间分布上的不匹配，加剧了电力工业发展的水压力和水风险。据估算，2000 年我国 58.5% 的燃煤发电量位于高和极高水压力地区<sup>[6]</sup>，2015 年这一比重上升到 66.5%，发电量绝对数更是增加了近 3 倍。“十二五”以来，西北和蒙东地区大型煤电基地建设步伐加快，使电力工业对当地水压力指数的贡献显著上升。

面对上述趋势，迫切需要加强电力工业的水资源管理，不断提高燃煤发电用水效率，将水资源节约作为煤电清洁化发展的重要内容。过去十余年来，我国出台了一系列管理制度和政策措施促进电力工业节水管理，例如，建立取水许可制度、建立水资源收费制度、在宁夏和内蒙古开展电厂水权转换试点、在北方缺水地区推广空冷技术、鼓励电厂利用中水等非常规水源<sup>[7]</sup>。在多种手段的共同作用下，燃煤发电用水强度不断下降，据中国电力企业联合会

<sup>1</sup> 数据来源中电联《中国电力行业年度发展报告 2019》

<sup>2</sup> Zhang, C., Zhong, L., Wang, J., Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 2018, 3: 792-799.

<sup>3</sup> 水利部发布的《2015 年中国水资源公报》显示，2015 年全国总用水量为 6103 亿立方米。

<sup>4</sup> 国家海洋局发布的《2015 年全国海水利用报告》显示，2015 年全国利用海水作为冷却水量为 1126 亿吨。

<sup>5</sup> Zhang, C., Zhong, L., Wang, J., Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 2018, 3: 792-799.

<sup>6</sup> 水压力（water stress）通常以某一流域范围内淡水取水量占地表水资源量的比重来衡量，根据世界资源研究所“水道”（Aquaduct<sup>TM</sup>）全球水风险分析框架的界定，该数值在 0.4-0.8 之间为高水资源压力，大于 0.8 为极高水资源压力。

<sup>7</sup> Zhang, C., Zhong, L., Fu, X., Zhao, Z. Managing scarce water resources in China's coal power industry. *Environmental Management*, 2016, 57: 1188-1203.

统计，全国燃煤发电平均耗水率从 2000 年的  $4.1 \text{ m}^3/\text{MWh}$  下降到 2018 年的  $1.23 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，降幅达到 70%<sup>[1]</sup>。平均用水效率的提升既有冷却技术结构变化和发电机组大型化带来的结构变化因素，也有技术改进和厂内水循环利用等全过程节水带来的技术进步因素。

在煤电工业水资源管理的各类政策措施中，用水定额发挥着基础性的作用<sup>8</sup>。用水定额体现了当前技术条件下，特定类型的发电机组在设计和运行阶段应达到的用水水平。以单位装机用水量 ( $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{GW}$ ) 核定的定额指标是新建电厂设计阶段开展水资源论证和取水许可审批的主要依据，以单位发电量用水量 ( $\text{m}^3/\text{MW}\cdot\text{h}$ ) 核定的定额指标是电厂运行过程中实际用水量的限额，也是评价电厂水资源利用水平的标杆。

随着火电工业技术进步，我国火电用水定额经历了三次修编。第一版定额发布于 2002 年 8 月 (GB/T 18820-2002)，被使用了近十年时间，于 2011 年 11 月废止。第二版定额发布于 2012 年 6 月 (GB/T 18916.1-2012)，在第一版基础上增加了空气冷却机组用水指标。2019 年 12 月水利部印发了 18 项工业用水定额 (水节约 (2019) 373 号)，其中火力发电部分替代 2012 年版国标。新版定额首次将用水指标划分为领跑值、先进值和通用值三个层次，并对机组容量进行了更加细化的分类，同时首次涵盖了天然气联合循环电厂。新版定额的一系列改进体现了水行政主管部门通过分类对标先进水平持续推动火电工业节水的意图。

本研究报告的主要目的是在评价我国燃煤机组用水水平现状的基础上，分析实施新版用水定额的预期节水效果，从而加深我们对节水政策的认识和理解。报告主要内容分为五个部分：首先介绍燃煤发电机组三类主要冷却技术的用水方式特征（第 2 章）；其次，回顾并比较了国家和地方燃煤发电用水定额修编的历史（第 3 章）；再次，分析了燃煤发电机组用水水平现状和影响因素，突出了技术差异和地区差异（第 4 章）；最后，第 5 章和第 6 章分别测算了实施新定额的预期节水量和重点省份节水的货币化价值。

<sup>8</sup> Zhang, C., Zhong, L., Fu, X., Zhao, Z., 2016. Managing scarce water resources in China's coal power industry. Environmental Management, 2016, 57, 1188-1203.

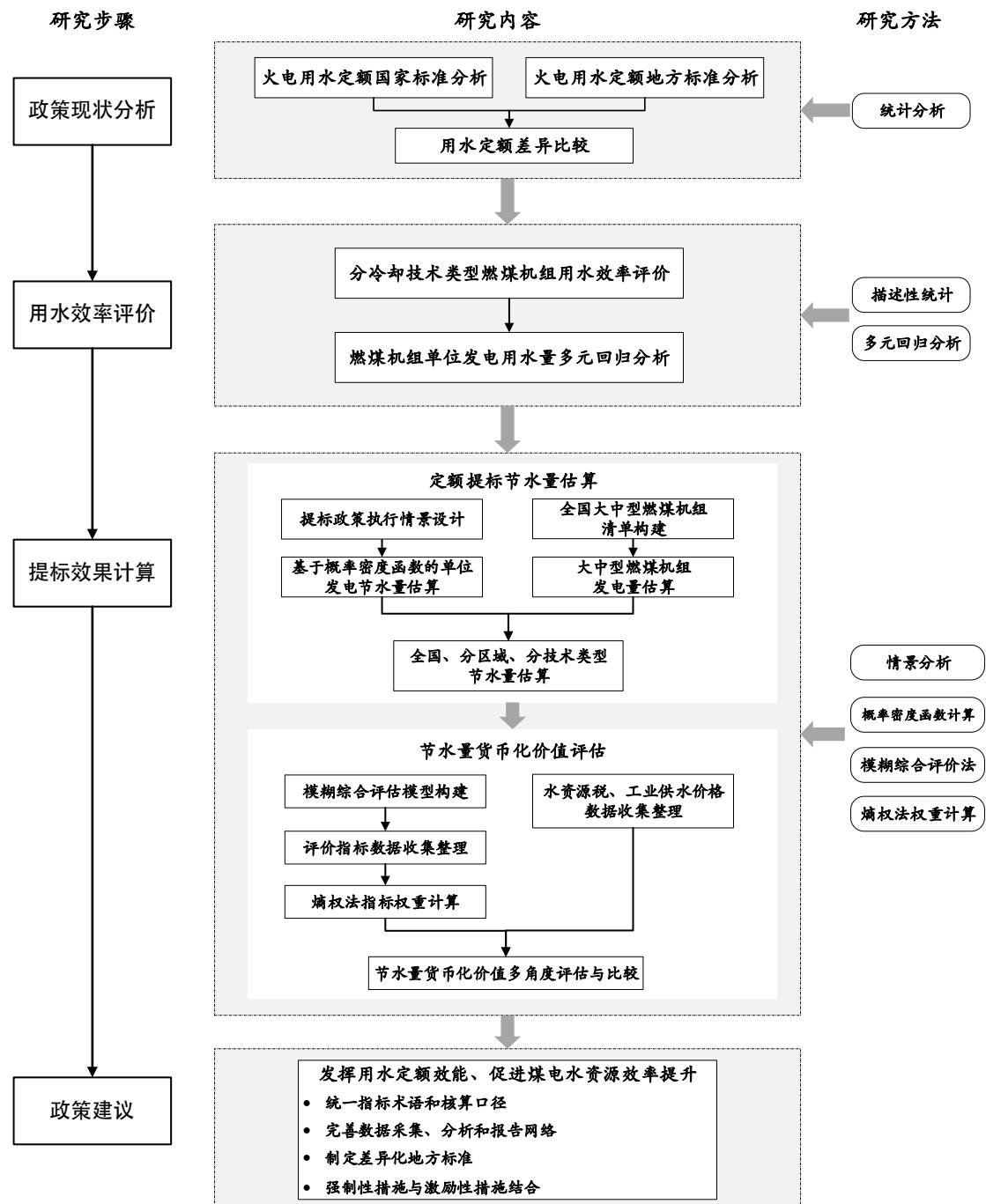


图 1. 研究技术路线图

## 2 燃煤机组用水方式

### 2.1 燃煤机组主要用水环节及用水指标界定

以煤为燃料的火力发电是最常用的发电方式，基本过程是通过以水为工质的朗肯循环将燃料燃烧的热能转化为电能。燃煤锅炉首先燃烧煤粉产生高压蒸汽，蒸汽经透平机械膨胀做功，带动发电机产生电力，透平后的乏汽进入凝汽器冷却后凝结为液态水，凝结水被重新送回锅炉，再次吸热转化为蒸汽用于透平发电。国家能源局发布的2019年全国电力工业统计数据显示，我国6000千瓦及以上燃煤发电平均供电标准煤耗为307克标准煤/千瓦时<sup>[9]</sup>，换言之，燃煤发电的平均综合热效率为40%左右。这意味着煤炭燃烧释放的热量只有约五分之二转化为电能，剩余部分热量主要以废热的形式耗散，其中一部分从锅炉排放的烟气中散失，另一部分则由凝汽器冷却过程带走<sup>[10]</sup>。传统燃煤电厂以水为冷却介质，冷却水在凝汽器中与乏汽换热，再通过升温或蒸发的方式带走废热。因此，凝汽器冷却是传统水冷电厂用水量最大的环节。直流冷却和循环冷却是两种最常见的水冷技术，其用水方式和特点存在很大差异（见2.2节、附录1）。除水以外，空气也可以作为冷却介质，空气冷却技术是我国火电工业应对缺水的关键适应性技术。

燃煤发电的其他工艺过程也都需要消耗水，主要包括湿法脱硫系统制备石灰石浆液，用于吸收烟气中的二氧化硫；水力除灰系统用水来排除煤炭燃烧后的灰渣；锅炉补水用于弥补工质蒸发损失；除凝汽器以外的其他主辅机设备冷却用水；输煤系统用于抑尘的喷淋和冲洗用水等。一般而言，上述工艺过程中脱硫系统消耗的水量最大。先进燃煤电厂普遍根据各工艺环节对水质的不同要求，进行串级用水和废水厂内回用，可以大幅减少取用原水的数量<sup>[11]</sup>。

需要注意的是，三次修编的用水定额中所使用的术语名称和核算范围并不一致，须加以仔细辨析，以免误用。2012版国标（GB/T 18916.1-2012）采用的是“取水定额”这一术语，将取水量定义为“从各种常规水资源提取的水量”，范围包括地表水、地下水、城镇供水工程等。定额规定直流冷却电厂取水量“不包括从江、河、湖等水体取水用于凝汽器及其他换热器开式冷却并排回原水体的水量”。由此可见，该定义排除了水量最大的凝汽器直流冷却用水，同时也并不包括污水厂中水、矿井水、海水淡化水等非常规水源。这与学术研究文献中采用较为普遍的全口径取水量核算范围存在差异，也与水利部门编制的《水资源公报》中全社会用水量的统计口径存在差异（《水资源公报》报告的用水量包含以淡水为水源的火电直流冷却水）。

<sup>9</sup> 参见：[http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c\\_138720881.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm)

<sup>10</sup> 采用背压式汽轮机的热电联产电厂回收凝汽器乏汽热量用于供热，与纯凝式电厂相比拥有更高的综合热效率。

<sup>11</sup> Jiang, D., Ramaswami, A. The ‘thirsty’ water-electricity nexus: field data on the scale and seasonality of thermoelectric power generation’s water intensity in China. Environmental Research Letter, 2015, 10: 024015.

水节约(2019)373号文件中的新版定额没有沿用“取水定额”这一名称,而是改为“用水定额”。“用水量”的核算口径有所扩大,指电厂“取自常规水源和非常规水源,并被第一次利用的水量总和”,不过同样不包括直流冷却水。将非常规水源纳入统计是为了适应当前电力工业水源类型多元化的发展趋势,特别是在北方缺水地区,城市污水厂中水用于火电厂冷却的比重日益提高。新定额与旧定额相比核算范围有所放宽,对于循环冷却和空气冷却电厂而言,等同于全口径取水量;但对于直流冷却电厂而言,依然排除了凝汽器直流冷却水,并非全口径取水量。

此外,无论是旧版还是新版定额,均未核定耗水量指标,说明用水定额编制过程中没有特别考虑电厂的排水环节。本研究报告的计算分析以新版定额核算范围为依据,用水效率评价和节水量的计算均不包含直流冷却水。

本报告中,为了与现行定额的表述保持一致,除直接引用早期定额的文件名称和相关内容外,我们采用“用水定额”这一术语来同时指代早期的“取水定额”。

## 2.2 燃煤机组冷却技术类型及特点

直流冷却、循环冷却和空气冷却是我国燃煤机组采用的三种主要冷却方式,三种技术的水资源利用方式、环境影响和经济性均存在很大差异,技术选择主要由水资源可得性、水文条件和技术经济考量等因素决定。三类冷却技术的取水量、耗水量大致范围,及其环境影响、经济性和适宜条件等特点如表1所列。三类冷却技术的基本原理参见[附录1](#)。

在我国现役机组中,循环冷却机组规模最大,约占燃煤发电量的52%,广泛分布于所有省份和各大流域,对水文和气象条件的适应性最强。淡水直流冷却机组约占燃煤发电量的13%,主要分布于南方水资源丰富地区,特别是水量充沛的长江干流、长江三角洲和珠江三角洲等地区,由于淡水直流冷却对河流径流扰动大、引发热污染问题,近年新建机组已较少采用,随着现有机组的退役,其数量呈不断下降趋势。海水冷却和空气冷却机组近十年发展迅速,占比分别达到15%和20%。燃煤电厂冷却是我国海水直接利用量最大的用途,海水冷却机组分布于沿海各省份,以直流冷却形式为主,有少量海水循环冷却机组。在水资源匮乏的北方地区,空气冷却技术已大量替代水冷技术,在新建燃煤电厂中得到广泛应用,特别是山西、内蒙古、宁夏、新疆等大型煤电基地建设区域。

表 1. 三类冷却技术特点比较

冷却类型	取水量 (m <sup>3</sup> /MW·h)	耗水量 (m <sup>3</sup> /MW·h)	水环境影响	经济性	适宜条件
直流冷却	80-120	0.18-0.42	<ul style="list-style-type: none"> <li>取水、退水过程干扰水源的自然流态</li> <li>影响水生生物种群</li> <li>排放热污染</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>设备投资在三类冷却技术中最低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>沿海、沿江等水资源丰富地区</li> <li>受径流量、水温等水文条件影响较大</li> </ul>
循环冷却	1.46-2.47	1.31-2.22	<ul style="list-style-type: none"> <li>循环冷却排污水盐离子浓度高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>设备投资高于直流冷却</li> <li>运行成本低于直流冷却</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对水文、气象条件的适应性最强，适合各类地区</li> </ul>
空气冷却	0.21-0.55	0.21-0.55	<ul style="list-style-type: none"> <li>单位供电煤耗高，增加碳排放量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>设备投资和运行成本均最高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>西北、华北等干旱缺水地区</li> <li>受气温、风速等气象条件影响较大</li> </ul>

注：直流冷却全口径取水量范围来自水利行政主管部门公示的部分直流冷却电厂取水许可申请材料；循环冷却和空气冷却取水量范围为 2017 年全国火电机组能效对标数据的 10% 和 90% 分位数（详见第 4 章）；假定直流冷却耗水量等于除直流冷却水以外的其他工艺过程取水量，数据同样来自 2017 年对标数据；假定循环冷却耗水量为取水量的 90%；并假定空气冷却耗水量等于取水量。

### 3 燃煤机组用水（取水）定额政策现状分析

#### 3.1 用水定额在火电水资源管理中的作用

用水定额是各区域，各行业，各企业用水、节水水平的一个衡量尺度。当前，工业节水成为了建设节水型社会最重要的内容之一，修订工业用水定额指标对于加强水资源管理和提高水资源的利用效率具有十分重要的意义。

为缓解水资源稀缺状况，建设节水型社会，实现水资源的可持续利用，1984年我国开始试行由原城乡建设环境保护部和国家经委联合发布的工业用水定额管理，之后开展了大量与工业用水定额相关的实践探索，如取水许可管理、水权转换试点等。工业企业产品“取水定额”指“以生产工业产品的单位产量为核算单元的合理取用常规水资源的标准取水量”<sup>[12]</sup>。该定额标准对促进工业企业用水和节水起到了一定的作用。

电力工业是用水量最大的工业部门，提高电力工业，尤其是燃煤发电的水资源利用效率，制定反映节水技术进步的用水定额，对于全国实现水资源管理目标具有现实而重大的意义<sup>[13]</sup>。截止2018年，我国发布的有关火电行业用水（取水）定额的国家标准主要有《工业企业产品取水定额编制通则》（GB/T 18820-2002）、《取水定额第一部分：火力发电》（GB/T 18916.1-2012）。地方标准中除西藏自治区发布的定额内无火力发电项目，其余30个省/自治区（除港澳台）的用水（取水）定额均对火力发电行业做了相关规定。火力发电行业用水（取水）定额指标为最高允许值，在实际应用中用水量应不大于定额指标值，包括“单位发电量取水量定额”和“单位装机容量取水量定额”。按照2012年版用水（取水）定额的指标解释，“单位发电量取水量”定义为“火力发电企业生产每单位发电量需要从各种常规水资源提取的水量”，该指标主要用于火力发电企业生产时使用。“单位装机容量取水量”定义为“按火力发电企业单位装机容量核定的取水量”，该指标主要用于火电厂的规划与设计。定额的颁布可以有效的指导火力发电厂规划、设计、施工和生产运行中的节水工作<sup>[14]</sup>，新定额往往在实施的第一年或者第二年就会对火电厂的实际用水效率产生明显的影响。但用水定额是一个动态指标，随着技术和管理水平的提高，节约用水工作的推进以及水资源条件的变化等<sup>[15]</sup>，需要定期的评估及修订用水定额，才能保持定额先进性、合理性和科学性的特点<sup>[16]</sup>。

<sup>12</sup> 《GB/T 18820-2011 工业企业产品取水定额编制通则》

<sup>13</sup> 潘荔, 刘志强, 张博. 中国火电节水现状分析及措施建议[J]. 中国电力, 2017, 50(11):158-163.

<sup>14</sup> 宋轩, 耿雷华, 杜霞, 王高旭, 王淑云. 我国火电工业取用水量及其定额分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(06):64-66+70.

<sup>15</sup> 罗陶露, 张树军, 郭秀红, 王学凤. 浅析用水定额指标体系建立[J]. 中国水利, 2010(09):40-42.

<sup>16</sup> 张丽, 张云, 钱树芹, 王伟. 用水定额研究进展浅议[J]. 中国水利, 2011(05):45-47.

### 3.2 国家层面火电用水（取水）定额标准修编

从2000年以来，我国对火电行业用水（取水）定额共进行了三次修编，分别是2002年发布的《工业企业产品取水定额编制通则》（GB/T 18820-2002）、2012年发布的《取水定额第一部分：火力发电》（GB/T 18916.1-2012）、2019年发布的水节约（2019）373号文件，具体定额数值设置如下：

➤ 《GB/T 18820-2002 工业企业产品取水定额编制通则》

2002-08-29发布，2003-01-01起实施，2011-11-01废止

表 2. 《GB/T 18820-2002》单位发电量取水量定额指标（m<sup>3</sup>/MWh）

机组冷却形式	单机容量<300MW	单机容量≥300MW 级
循环冷却	≤4.80	≤3.84
直流冷却	≤1.20	≤0.72

表 3. 《GB/T 18820-2002》单位装机容量取水量定额指标（m<sup>3</sup>/s·GW）

机组冷却形式	单机容量<300MW	单机容量≥300MW 级
循环冷却	≤1.0	≤0.8
直流冷却	≤0.2	≤0.12

➤ 《GB/T 18916.1-2012 取水定额 第1部分：火力发电》

2012-06-29发布，2013-01-01起实施

表 4. 《GB/T 18916.1-2012》单位发电量取水量定额指标（m<sup>3</sup>/MWh）

机组冷却形式	单机容量<300MW	单机容量 300MW 级	单机容量≥600MW 级
循环冷却	3.20	2.75	2.40
直流冷却	0.79	0.54	0.46
空气冷却	0.95	0.63	0.53

表 5. 《GB/T 18916.1-2012》单位装机容量取水量定额指标（m<sup>3</sup>/s·GW）

机组冷却形式	单机容量<300MW	单机容量 300MW 级	单机容量≥600MW 级
循环冷却	0.88	0.77	0.77
直流冷却	0.19	0.13	0.11
空气冷却	0.23	0.15	0.13

注：单机容量 300MW 级包括：300≤单机容量<500MW 的机组，单机容量 600MW 级及以上包括：单机容量≥500MW 的机组。

➤ 水节约〔2019〕373号

2019-12-09发布, 2020-02-01实施

表 6. 水节约〔2019〕373号火力发电机组用水定额 (m<sup>3</sup>/MWh)

类型	机组冷却形式	机组容量	领跑值	先进值	通用值
燃煤发电	循环冷却	<300MW	1.73	1.85	3.20
		300MW 级	1.60	1.70	2.70
		600MW 级	1.54	1.65	2.35
		1000MW 级	1.52	1.60	2.00
	直流冷却	<300MW	0.25	0.30	0.72
		300MW 级	0.22	0.28	0.49
		600MW 级	0.20	0.24	0.42
		1000MW 级	0.19	0.22	0.35
	空气冷却	<300MW	0.30	0.32	0.80
		300MW 级	0.23	0.30	0.57
		600MW 级	0.22	0.27	0.49
		1000MW 级	0.21	0.24	0.42

注: 1.当机组采用再生水时, 再生水部分的定额指标按以下方式进行调整:

a)循环冷却机组定额调整系数为 1.2;

b)空气冷却机组定额调整系数为 1.2;

c)直流机组不予调整

2.领跑值为节水标杆, 用于引领企业节水技术进步和用水效率的提升, 可供严重缺水地区新建(改建、扩建)企业的水资源论证、取水许可审批和节水评价参考使用; 先进值用于新建(改建、扩建)企业的水资源论证、取水许可审批和节水评价; 通用值用于现有企业的日常水管理和节水考核。

3.先进值为新建(改建、扩建)企业设计阶段平均单位发电量。

对比这三次不同时期制定的火电行业用水(取水)定额, 我们可以看到三个清晰的变化: 一是冷却技术类型更加全面, 2012 年发布的定额新增了空气冷却机组用水标准, 适应了“十一五”以来空气冷却技术在我国迅速推广的现状。二是机组装机容量的划分不断细化, 2002 年发布的定额只将机组划分为“<300MW”与“≥300MW 级”两类, 而后发布的两次定额都对大于 300MW 机组进行更加细化的装机容量划分, 体现了我国大型燃煤机组快速发展、技术水平不断提升的现状。三是所有类型机组的用水(取水)定额数值均有所下降, 反映了十余年来我国燃煤机组用水效率不断提升。

### 3.3 火电用水（取水）定额地方标准比较分析

#### 3.3.1 地方标准概览

我们收集并比较了在国家定额标准指导下，各省出台和修编火电行业用水（取水）定额地方标准的历史，以探究地方标准修编的特点，分析地方标准与国家标准之间的关系。首先我们对 2000-2017 年各省区的火电用水（取水）定额地方标准的更新频次进行了对比分析，如图 2 所示，除西藏自治区未制定火电行业标准外，其他省市自治区均已出台相应地方标准。在已制定火电用水（取水）定额地方标准的省区中，更新频次最多的是黑龙江省，达到了 4 次；而新疆、贵州、北京在 2000-2017 年期间只对用水（取水）定额进行了一次修编。其中，新疆是产煤大省，近年来大型煤电基地发展迅速，并且大部分新建燃煤电厂位于水资源十分稀缺的干旱和半干旱地区，而目前仍然沿用 2007 年发布的用水（取水）定额。这反映出个别省区地方标准更新滞后，在火电工业规模、结构和技术水平迅速发展的情况下，过于陈旧的标准难以适应节水管理需求，因此这些省区需要结合当地实际情况尽快更新其地方标准。

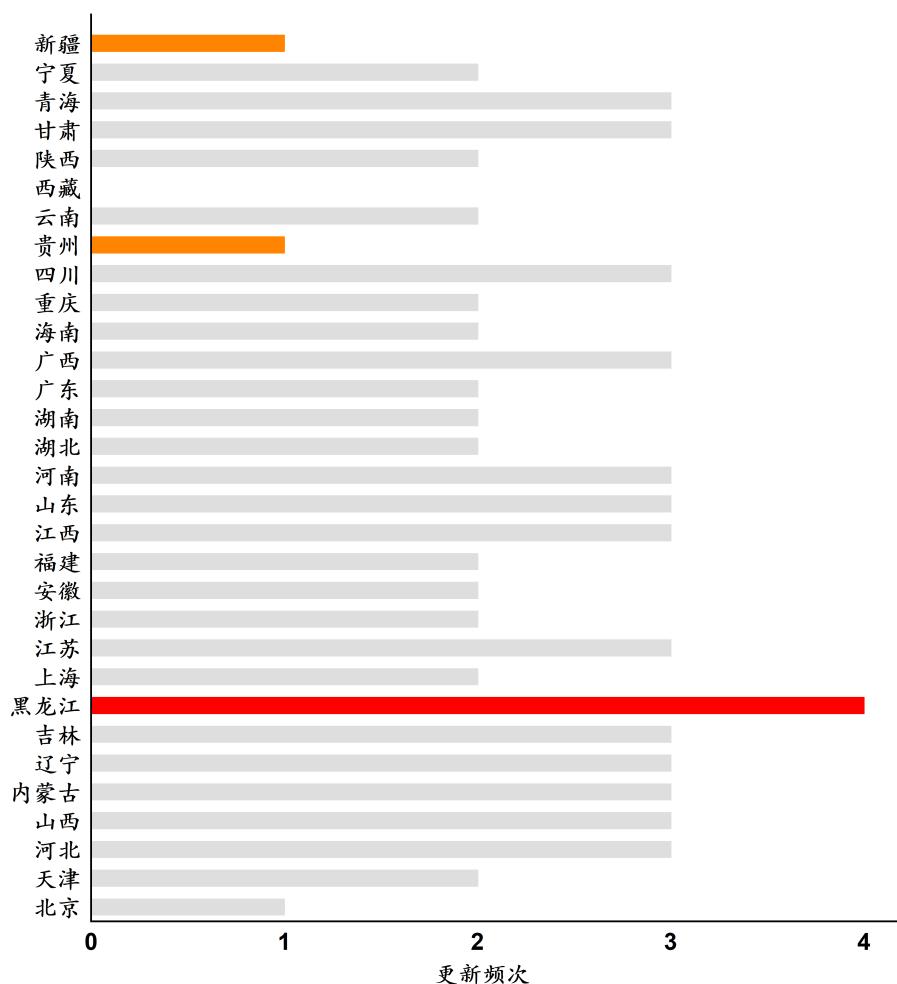


图 2. 2000-2017 年地方用水（取水）定额更新频次

我们进一步统计了 2000-2017 年间每年分别有多少个省份进行了定额更新。如图 3 所示, 2003 年和 2014 年更新定额标准的省区最多, 总数都达到了 9 个, 此后的 2004 和 2015 年更新省区数量也分别达到了 6 个和 8 个。其原因可能在于 2002 与 2012 年国家标准委发布了国家用水(取水)定额, 在此后的一至两年时间内较多省区根据国家定额标准对本地的地方标准进行了更新, 以满足更加严格的国家标准。从地方标准更新的时间节点上可以发现, 出台新的国家标准对地方用水(取水)定额的更新具有明显的推动作用, 能够在短时间内促进地方标准提升, 节水政策体现出较为显著的自上而下逐级推进特征。

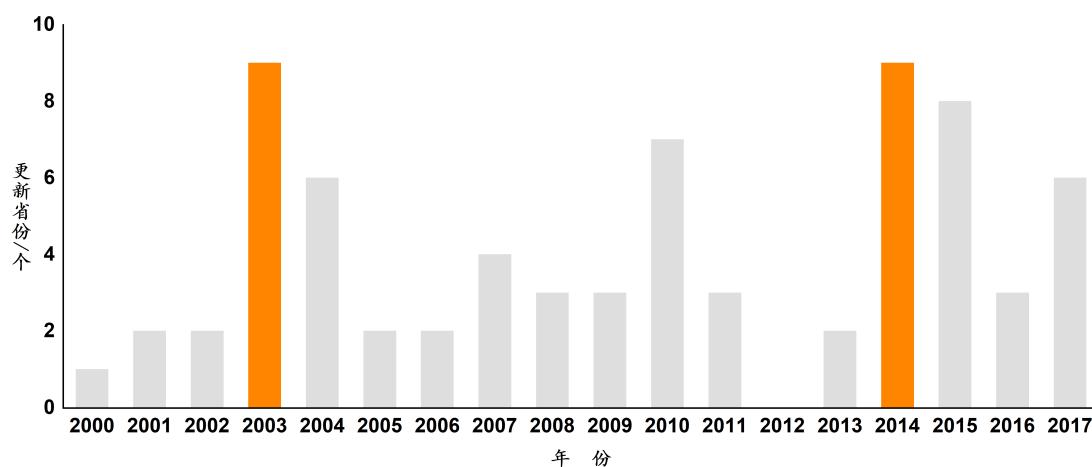


图 3. 2000-2017 年每年更新省份个数

表 7 概括了最近一次修编的地方标准在冷却技术类型、机组容量划分和指标类型三方面的异同。冷却技术类型方面, 北京、天津、贵州和新疆四地没有列明具体技术类型, 根据指标数值大小判断, 实际对应的应该为循环冷却机组。其余省区中, 划分两类冷却技术的有 17 个, 占总数的 57%; 涵盖全部三类冷却技术的有 9 个, 占总数的 30%。冷却技术类型的覆盖范围总体上体现了不同地区的技术结构特点。西北地区水资源匮乏, 几乎没有直流冷却电厂, 因此陕西、甘肃、青海、宁夏四地的标准不包含直流冷却技术; 而南方多数省份也没有制定空冷技术的取水标准。同时我们也发现个别地区的覆盖范围与实际冷却技术结构不符, 例如, 湖北、广东、云南三地水资源充沛, 事实上不可能建设大型空冷燃煤电厂, 因此涵盖空冷技术并不十分必要。

机组容量划分方面, 除北京、新疆两地未区分外, 其余省区均进行了不同程度的区分。上海、重庆两地划分为两类; 23 个省区划分为三类, 占总数的 77%; 内蒙古和宁夏划分为四类; 贵州最为细化, 包含 150MW 以下至 1000MW 以上五个装机容量等级。为保持与国家定额标准的一致性, 300MW 和 600MW 是各地方标准中使用最广泛的两个机组容量分类

标准。机组容量大小对单位发电煤耗和热效率具有显著影响，也是决定机组用水水平的主要因素，为此多数地方标准体现了分级管理的思路。

最后，指标类型方面，9个省区同时制定了针对设计环节的“单位装机容量取水量”标准和针对运行环节的“单位发电量取水量”标准，仅占总数的30%。其他省区中，山西和宁夏仅有“单位装机容量取水量”标准，另外19个省区仅有“单位发电量取水量”标准。在煤电工业依然处于建设发展阶段的地区，特别是北方煤电基地所在地，有必要同时出台设计标准和运行标准，为煤电项目的全过程用水管理提供依据。

表 7. 各省自治区用水（取水）定额地方标准划分方式比较

省区	冷却类型	机组容量	指标类型	省区	冷却类型	机组容量	指标类型
北京	不区分	不区分	▲	河南	① ②	<300MW;300MW;≥300MW	▲
天津	不区分	<200MW;200-500MW;≥500MW	▲	湖北	① ② ③	<300MW;300-500MW;≥500MW	▲
河北	① ② ③	<300MW;≥300MW;≥600MW	▲▲	湖南	① ②	<300MW;≥300MW;≥600MW	▲
山西	② ③	<300MW;300-600MW;600-1000MW	▲	广东	① ② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲
内蒙古	① ② ③	<50MW;<300MW;≥300MW;≥600MW	▲▲	广西	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲
辽宁	① ② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲	海南	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲
吉林	① ② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲	重庆	① ②	<300MW;≥300MW	▲
黑龙江	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲	四川	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲
上海	① ②	<600MW;≥600MW	▲	贵州	不区分	<150MW;≥150MW;300-600MW;600-1000MW;≥1000MW	▲
江苏	① ②	<300MW;300-500MW;≥500MW	▲	云南	① ② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲
浙江	① ② ③	<300MW;300-500MW;≥500MW	▲	陕西	② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲
安徽	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲	甘肃	② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲
福建	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲	青海	② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲
江西	① ②	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲	宁夏	② ③	<300MW;300-500MW;500-1000MW;≥1000MW	▲
山东	① ② ③	<300MW;300MW;≥600MW	▲▲	新疆	不区分	不区分	▲

注：符号含义①直流冷却，②循环冷却，③空气冷却，▲单位发电量取水量，▲单位装机容量取水量

### 3.3.2 用水（取水）定额地区差异比较

我国不同地区水资源禀赋和供需格局差异很大，不同的水文、气象条件和节水管理的严格程度使燃煤机组用水水平存在较为明显的地区差异（参见4.3节）。因此，地方用水定额制定的一般原则应当是在满足国家标准的基础上，体现本地区水资源稀缺性和用水技术水平。

图4比较了各地区直流冷却机组用水定额指标（不含贯流式冷却水），可以发现多数省区采用了与2012年版国家定额标准一致的数值，个别地区存在超出国家定额的情况，例如，江苏省小于300MW级机组的单位发电取水量规定为0.63m<sup>3</sup>/MWh，超出该类型机组用水定额国家标准的14%；上海市对300MW级机组的单位发电取水量规定为0.9m<sup>3</sup>/MWh，超出

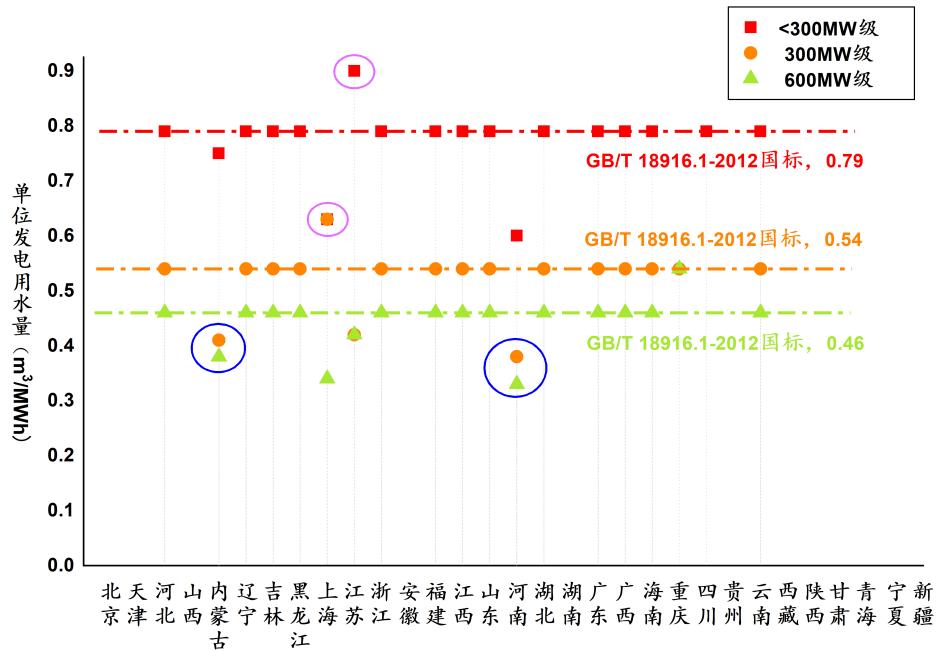
该类型机组用水定额国家标准的 17%。重庆市只规定了 300MW 级及以上装机容量机组的用水定额，未对大型燃煤机组进一步划分用水定额，所以其 600MW 级机组的用水定额与 300MW 级机组一致为  $0.54 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 。

图 5 显示了循环冷却机组的地方用水（取水）定额标准，所有省区均对循环冷却机组的用水定额作出了规定。其中，上海、山东、重庆、贵州四地的循环冷却机组用水（取水）定额均出现了高于同类型机组国家标准的情况，有违地方标准等同或严于国家标准的原则<sup>[17]</sup>。值得注意的是上海市 600MW 级循环冷却机组的单位发电用水（取水）定额为  $2.75 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，比 300MW 级机组的用水（取水）定额高 45%，与机组装机容量越大，单位发电用水量越少的一般情况不符。

在 2012 年国家发布的《取水定额第一部分：火力发电》（GB/T 18916.1-2012）对空气冷却机组的用水（取水）定额作出明确规定后，14 个省区相继在新出台的定额中增添了对空冷机组的相关规定。如图 6 所示，当前各地空冷机组的定额地方标准均未超出国家标准。内蒙古的空冷机组定额最为严格，小于 300MW 级、300MW 级和 600MW 级空冷机组定额分别比对应的国家标准低 40%、35% 和 28%，利于推动电厂采取更加严格的节水措施，体现了因地制宜的原则。

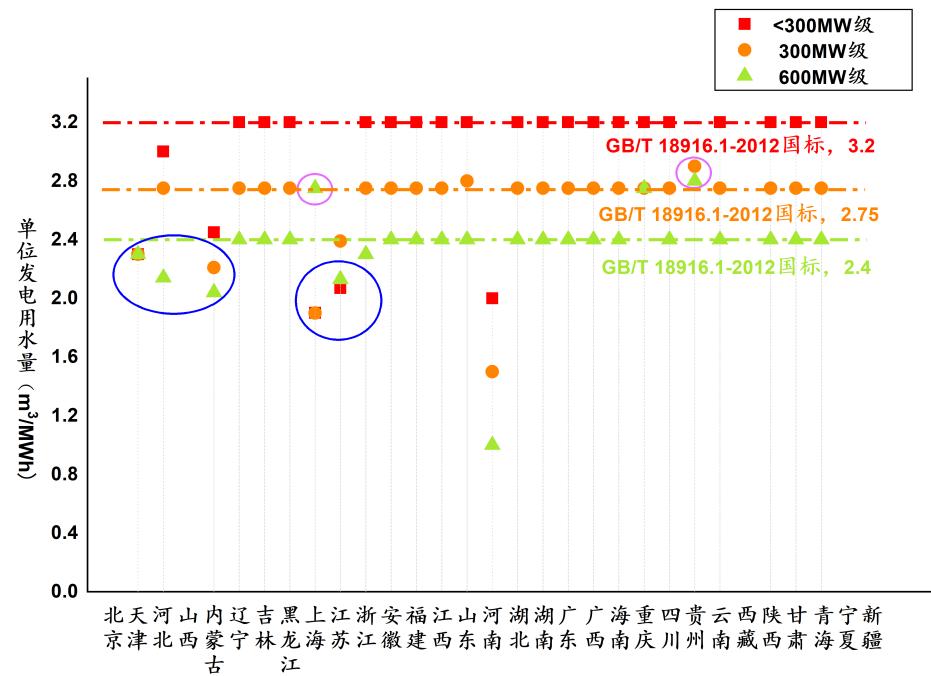
最后，表 8 汇总了所有地方标准严格程度不及国家标准的情况（以 2012 年版国标为比较依据），此类地区在未来更新地方标准时，应及时做出调整。总体而言，绝大多数地方用水定额指标均直接参照国家标准设定，地区差异性并不显著。缺水地区未能制定更加严格的地方标准，以回应水资源供需矛盾，这从一个侧面反映了各地通过用水（取水）标准政策推动最严格水资源管理的动力不足。

<sup>17</sup> 钟丽锦，付晓天. 中国煤炭工业的水资源管理：政策综述. 世界资源研究所. 2016.4.



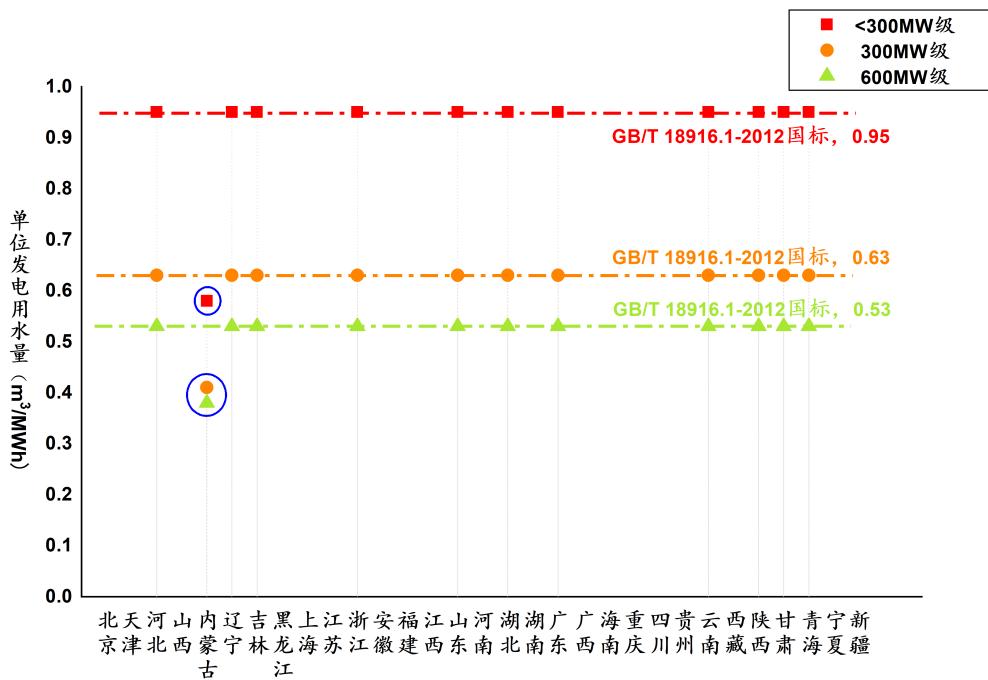
注：湖南和安徽两省直流冷却机组用水定额指标包括了贯流式冷却水，缺乏可比性，未在图中列出。

图 4. 直流冷却机组用水（取水）定额地方标准比较



注：图中比较的是循环冷却机组单位发电用水量的定额标准，山西省，宁夏回族自治区的循环冷却机组用水定额只针对单位装机容量，因此不在图中列出。

图 5. 循环冷却机组用水（取水）定额地方标准比较



注：图中比较的是空气冷却机组单位发电用水量的定额标准，山西省，宁夏回族自治区的空气冷却机组用水定额只针对单位装机容量，因此不在图中列出。

图 6. 空气冷却机组用水（取水）定额地方标准比较

表 8. 地方标准高于国家标准的情况汇总 (m³/MWh)

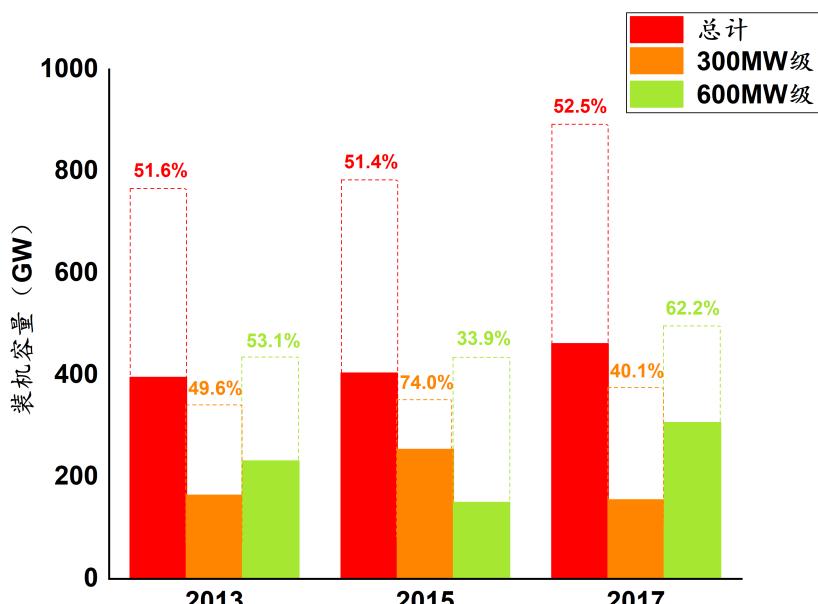
机组类别	区域	定额指标
300MW 级循环机组	国家标准	2.75
	山东省	2.8
	贵州省	2.9
600MW 级循环机组	国家标准	2.4
	上海市	2.75
	重庆市	2.75
	贵州省	2.8
<300MW 级直流机组	国家标准	0.79
	江苏省	0.9
300MW 级直流机组	国家标准	0.54
	上海市	0.63
600MW 级直流机组	国家标准	0.46
	重庆市	0.54

## 4.中国大中型燃煤机组用水效率评价

### 4.1 数据说明

我们以中国电力企业联合会发布的全国火电机组能效对标为用水效率评价的主要数据来源，使用了 2013、2015 和 2017 三个年度的对标数据。参与对标的数据机组装机容量超过当年全国燃煤机组总装机容量的 50%，具有较高的覆盖率和代表性。对标数据报告了机组铭牌容量、年发电量、冷却技术类型、水源类型、单位发电综合耗水率（ $\text{m}^3/\text{MWh}$ ）等相关数据。经向行业专家求证，对标数据中的“单位发电综合耗水率”实际核算口径与新版用水定额核算口径基本一致，但个别电厂上报数据可能存在疏漏，比如遗漏了中水等非常规水资源的取水量，导致数值过低。由于无法逐一鉴别和修正具体数值，我们直接采用原始上报的用水数据进行分析。为避免对指标名称的误解，并与新版定额用词保持一致，下文统一采用“用水量”、“用水效率”进行表述。对个别机组的技术信息错误或缺失，作了如下更正：

- 1) 个别机组冷却技术类型标注错误，与用水量数据明显不符。通过检索发电机组的取水许可批复材料、环境影响评价报告书等相关行政许可文件，核实技术类型，进行修正。
- 2) 部分机组水源类型信息缺失或错误。通过网络信息检索，确认是否存在使用城市中水等非常规水资源作为冷却水源的情况。信息来源包括：取水许可批复材料、环境影响评价报告、电力企业网站信息、学术期刊论文、媒体刊登的关于电厂使用非常规水源的新闻报道等。对于没有资料显示利用非常规水源的情况，则假定机组取用地表水。



注：实心矩形代表对标数据，空心矩形代表对标数据未覆盖的全国同类型机组容量

图 7. 对标数据覆盖率

从上述三个年度对标数据中共获得有效样本 2933 个。根据装机容量划分, 2013 年样本共 963 个, 小于 300MW 机组 108 个, 300MW 级机组 ( $300\text{MW} \leq \text{装机容量} \leq 500\text{MW}$ ) 507 个, 600MW 级机组<sup>[18]</sup> ( $\text{装机容量} \geq 500\text{MW}$ ) 348 个; 2015 年样本共 996 个, 小于 300MW 机组 56 个, 300MW 级机组 ( $300\text{MW} \leq \text{装机容量} \leq 500\text{MW}$ ) 504 个, 600MW 级机组 ( $\text{装机容量} \geq 500\text{MW}$ ) 436 个; 2017 年样本共 974 个, 300MW 级 ( $300\text{MW} \leq \text{装机容量} \leq 500\text{MW}$ ) 机组 516 个, 600MW 级机组 ( $\text{装机容量} \geq 500\text{MW}$ ) 458 个。

根据冷却方式划分, 2013 年样本中有直流冷却机组 317 个, 循环冷却机组 494 个, 海水循环机组 4 个, 空冷机组 148 个。2015 年样本中有直流冷却机组 356 个, 循环冷却机组 495 个, 海水循环机组 2 个, 空冷机组 143 个。2017 年样本中有直流冷却机组 321 个, 循环冷却机组 489 个, 空冷机组 164 个。

我们对 2017 年样本机组的空间分布进行了统计。如图 8 所示, 冷却技术的选择存在明显的地区差异, 空冷机组主要分布在西北、华北、蒙西等干旱缺水地区, 而覆盖长江下游流域的华东电网拥有大量直流冷却机组, 循环冷却机组在所有地区均有分布。可见, 地区水资源可用性是冷却技术选择的关键决定性因素。

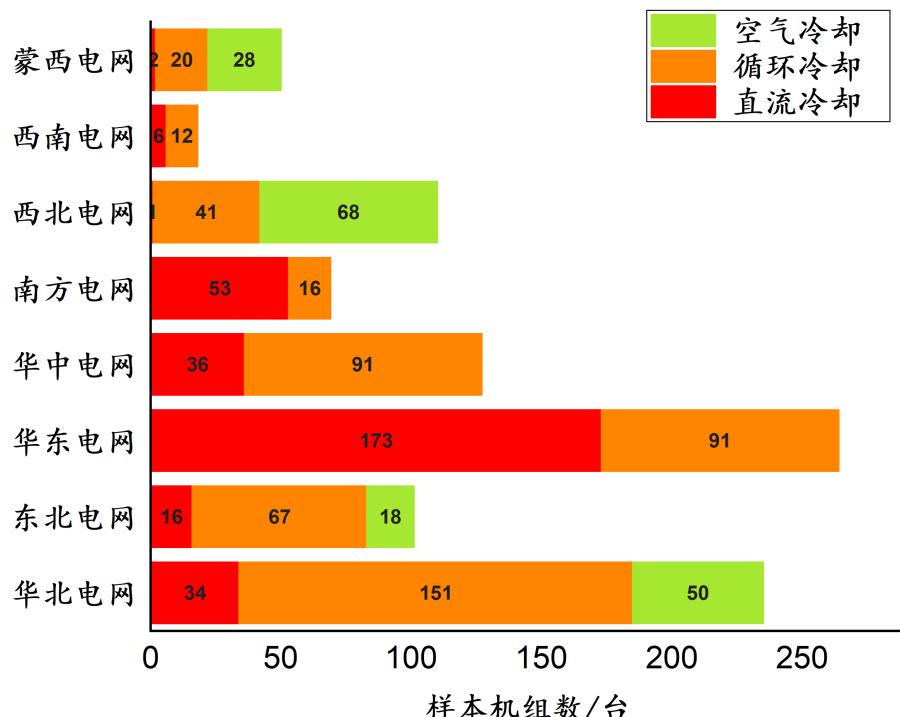


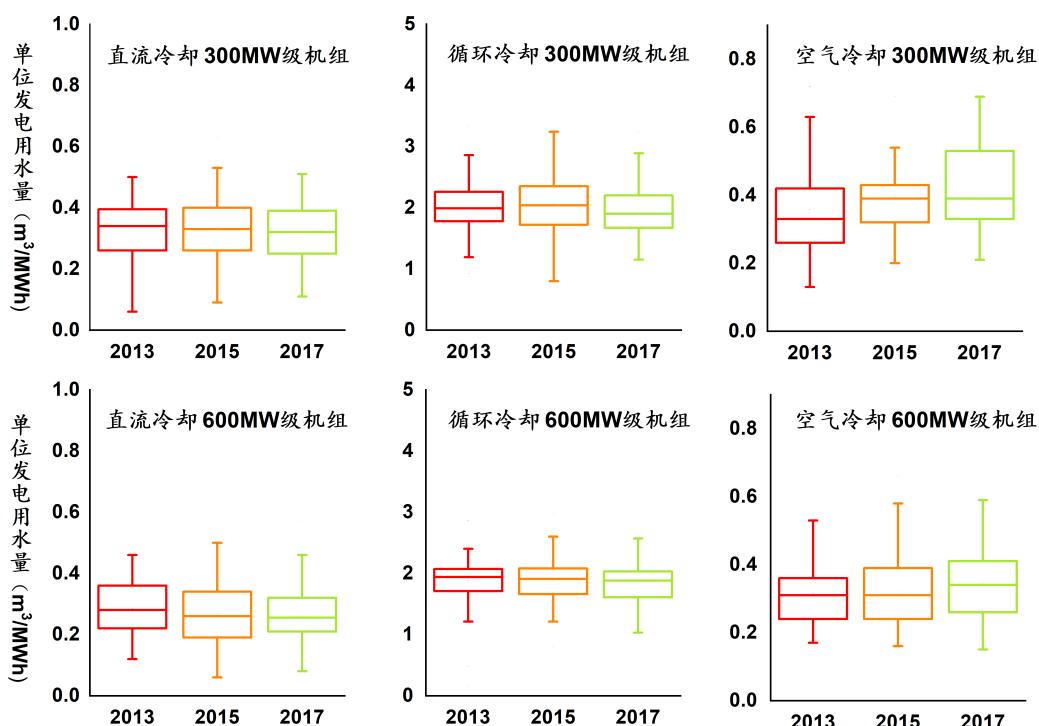
图 8. 2017 年对标机组冷却技术空间分布

<sup>18</sup> 600MW 级机组包括装机容量 1000MW 的机组。

## 4.2 机组用水效率评价

### 4.2.1 单位发电用水量整体变化

图9绘制了三个年度区分冷却技术、机组容量的单位发电用水量箱线图。结果显示，直流冷却和循环冷却机组用水量变化相对较小，300MW级循环冷却机组用水量中位数从2013年的 $1.99 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 下降至2017年的 $1.90 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，降幅4.5%；600MW级循环冷却机组用水量中位数从 $1.94 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 下降至 $1.88 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，降幅3.1%；600MW级直流冷却机组用水量中位数从 $0.28 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 下降至 $0.25 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，降幅10.7%；300MW级直流冷却机组用水量中位数基本保持不变。相比而言，空冷机组在2013-2017年间单位发电用水量中位数出现了较为明显的上升，300MW级机组用水量中位数从2013年的 $0.33 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 上升至2017年的 $0.39 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，升幅18.2%；600MW级机组用水量中位数从 $0.31 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 上升至 $0.34 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，升幅9.7%。



注：每个箱线图箱形表示上四分位数、中位数和下四分位数，两端短横代表上边界和下边界。

图 9. 2013-2017 年分冷却技术、分机组容量单位发电用水量变化

究其原因，早期建的很多空冷机组没有尖峰冷却装置。空冷机组在夏季高温环境下运行会出现高背压、限负荷等运行状态，影响汽轮机安全。为解决此问题，我国大部分新建空冷机组采用了尖峰冷却装置来提高度夏能力。尖峰冷却装置采用蒸发冷却技术原理，利用水蒸

发潜热带走热量，以达到在高温环境下降低空气温度的目的。这可能是造成其整体单位发电用水量增加的主要原因。直流冷却电厂近年来新建数量很少，且以 600MW、1000MW 级大型机组为主，因此对标包含的直流冷却机组大多建设年份较早，样本相对稳定，相应的发电用水量也就没有出现增加趋势。对于循环冷却机组而言，可供选择的节水措施更加丰富，在面对严格的水资源管理政策下，循环冷却机组的节水操作空间最大。例如，可以应用更加先进的原水处理和除垢技术，提高循环冷却水品质，以更高的循环浓缩倍率运行，减少冷却水取水量和排污量；此外，串级用水和厂内水处理回用等技术措施也不断推广普及，从整体上提升了循环冷却机组的用水效率。

下面，我们以 2017 年数据为例，进一步展示各类机组单位发电用水量的分布特征，并与新版定额进行比较。

#### 4.2.2 直流冷却机组用水效率评价

2017 年 300MW 级和 600MW 级直流冷却机组单位发电用水量频数分布分别如图 10、图 11 所示。2012 年发布的《取水定额第一部分：火力发电》(GB/T 18916.1-2012) 中 300MW 级直流冷却机组用水（取水）定额为  $0.54\text{m}^3/\text{MWh}$ ，除极个别样本外，几乎所有机组都能满足这一定额。比照新版定额，96.6% 的机组能够满足通用值  $0.49\text{m}^3/\text{MWh}$ ，30.8% 的机组能够满足先进值  $0.28\text{m}^3/\text{MWh}$ ，满足领跑值  $0.22\text{m}^3/\text{MWh}$  的比例为 17.8%。

2012 年版国标定额中 600MW 级直流冷却机组的用水（取水）定额为  $0.46\text{m}^3/\text{MWh}$ ，同样几乎所有对标机组都能满足这一定额。比照新版定额，96% 的机组能够满足通用值  $0.42\text{m}^3/\text{MWh}$ ，46% 的机组能够满足先进值  $0.24\text{m}^3/\text{MWh}$ ，满足领跑值  $0.20\text{m}^3/\text{MWh}$  的比例为 22%。

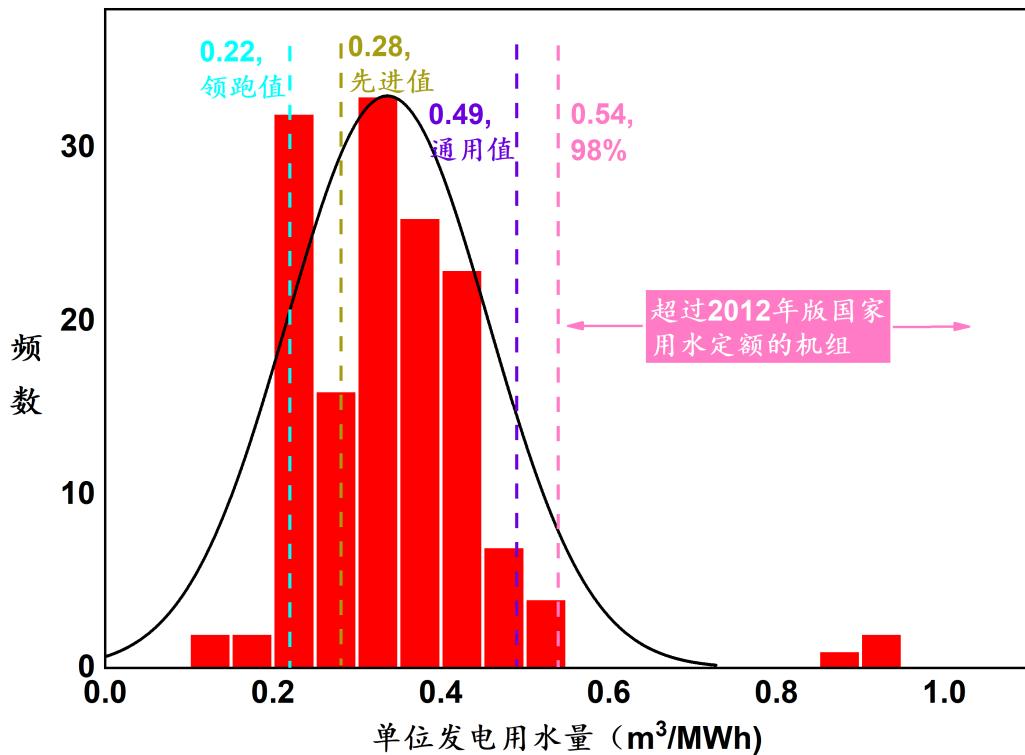


图 10. 2017 年 300MW 级直流冷却样本机组单位发电用水量频数分布

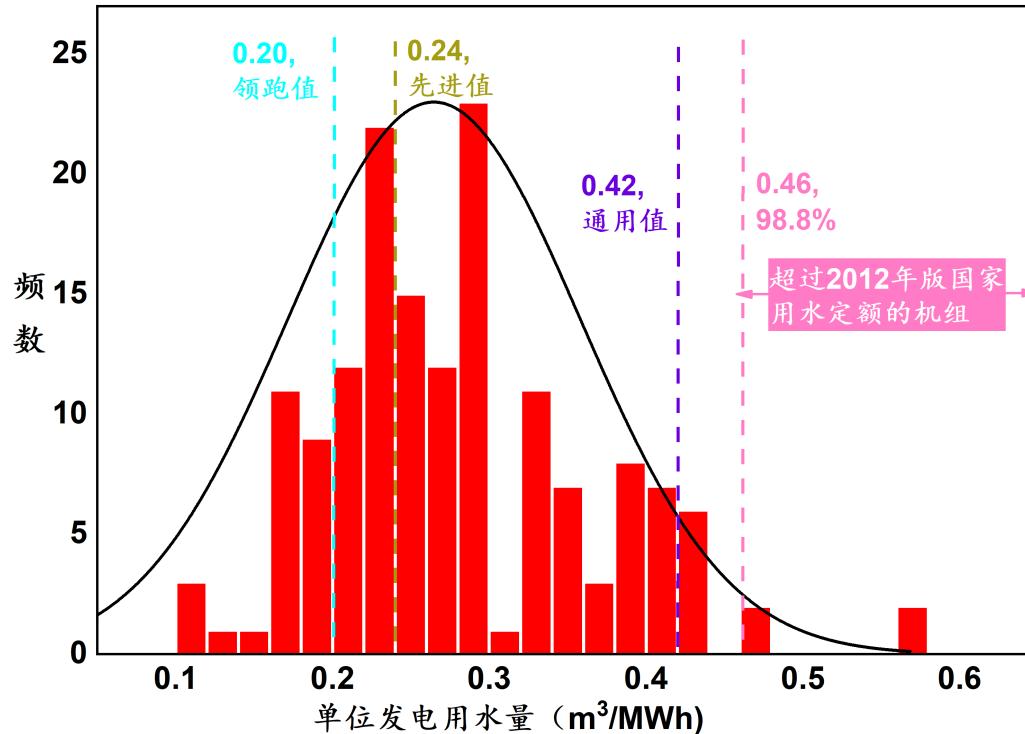


图 11. 2017 年 600MW 级直流冷却样本机组单位发电用水量频数分布

#### 4.2.3 循环冷却机组用水效率评价

图 12、13 是关于 300MW 级和 600MW 级的循环冷却机组的用水效率评价。我们发现循环冷却机组的单位发电用水量数据较离散, 最大单位发电用水量约是最小值的 2.8 倍。94% 的 300MW 级循环冷却机组都满足 2012 版国标定额, 即  $2.75\text{m}^3/\text{MWh}$ 。满足新版定额中先进值  $1.7\text{m}^3/\text{MWh}$  的循环冷却机组占比为 30%, 满足领跑值  $1.60\text{m}^3/\text{MWh}$  的循环冷却机组占比为 16 %。

97% 的 600MW 级循环冷却机组都满足 2012 版国标定额, 即  $2.40\text{m}^3/\text{MWh}$ , 与满足新版用水定额中通用值  $2.35\text{m}^3/\text{MWh}$  的机组比重极为接近。满足新版定额先进值  $1.65\text{m}^3/\text{MWh}$  和领跑值  $1.54\text{m}^3/\text{MWh}$  的 600MW 级循环冷却机组比重分别为 30% 和 19%。

图 14 展现了在我国北方地区使用常规水及非常规水的循环冷却机组单位发电用水量的差异。使用非常规水的循环冷却机组用水量集中在  $1.75\text{--}2.21\text{m}^3/\text{MWh}$ , 使用常规水的机组用水量整体略低一点, 集中在  $1.62\text{--}1.73\text{m}^3/\text{MWh}$ ; 采用非常规水源的机组用水量的中位数是  $1.97\text{m}^3/\text{MWh}$ , 比使用常规水的机组用水量的中位数高 14%。可见, 循环冷却机组的用水量会受水源类型影响, 通常中水杂质含量较高, 为满足冷却水水质要求, 电厂需要进行额外净化处理, 导致原水用量增加。

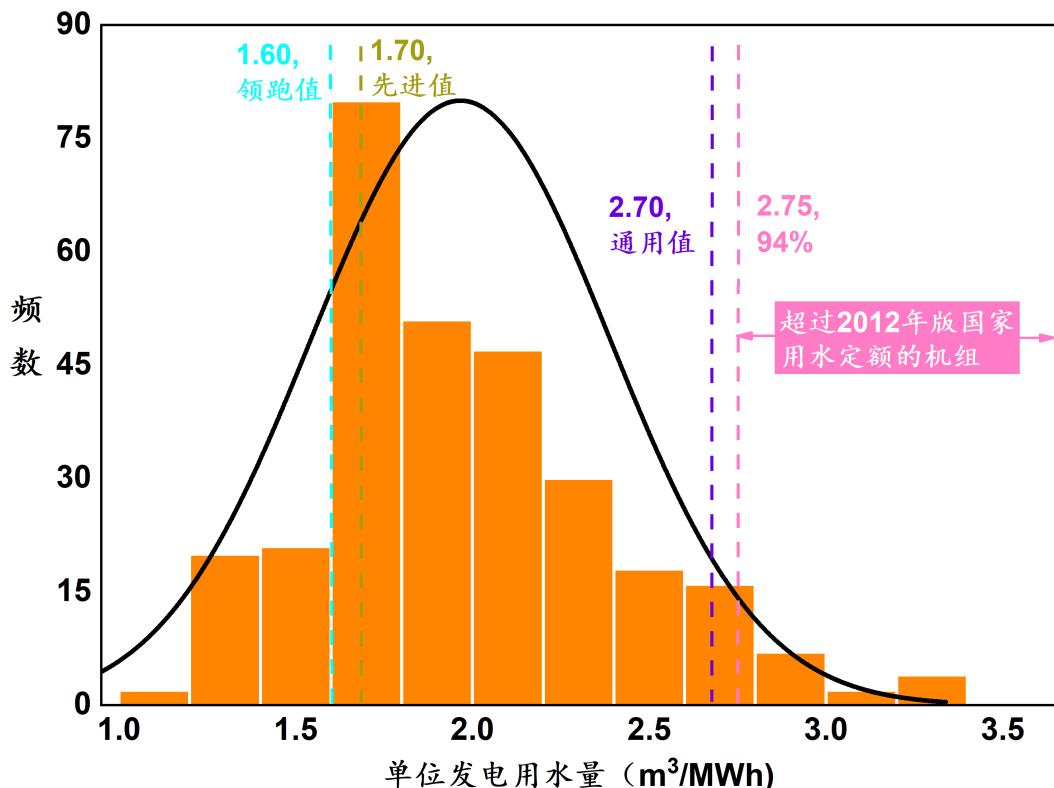


图 12. 2017 年 300MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量频数分布

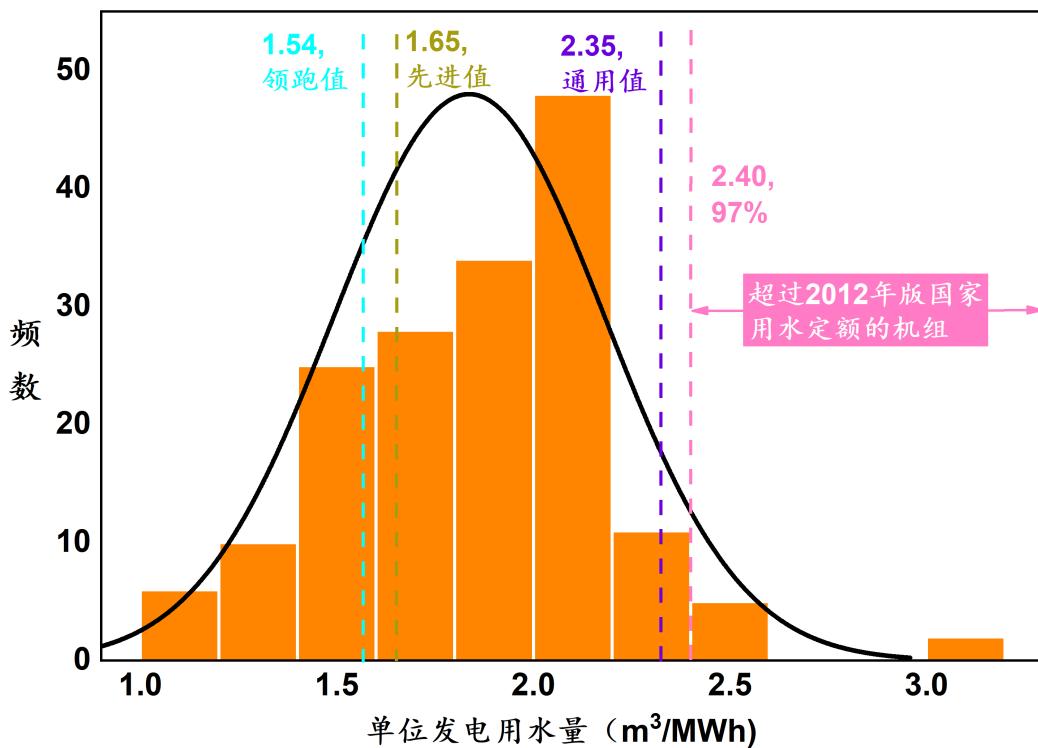
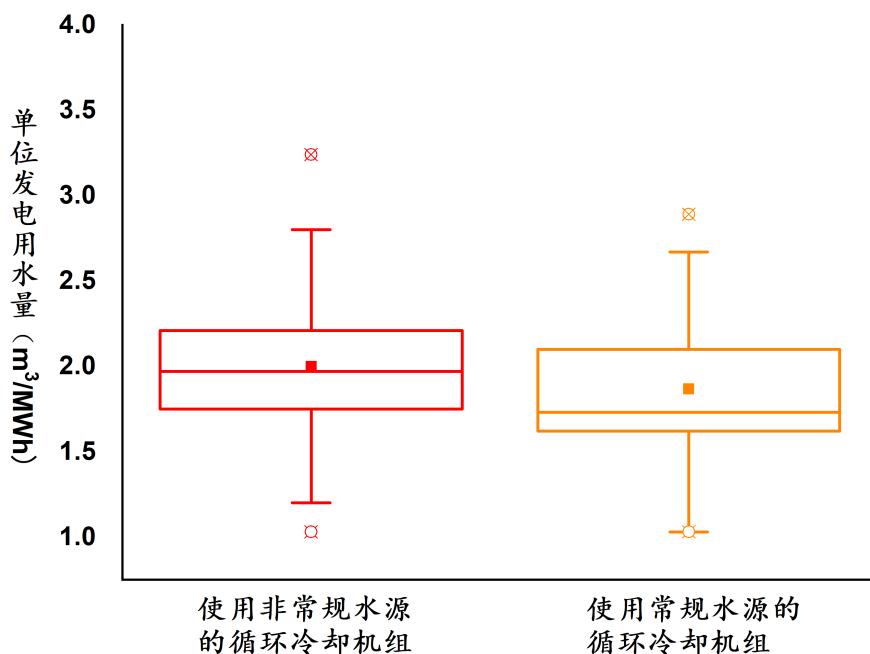


图 13. 2017 年 600MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量频数分布



注：1. 北方地区包括华北区域、东北区域和西北区域。

2. 每个箱线图箱形表示上四分位数、中位数和下四分位数，两端短横代表上边界和下边界，实心正方形代表平均值， $\times$ 代表 95%/5% 分位数，圆圈代表最小值/最大值。

图 14. 我国北方地区不同水源类型的循环冷却机组用水效率评价

循环冷却机组用水效率的一个重要特点是存在明显的地理空间差异。图 15 按 8 个区域电网对 300MW 级机组进行了进一步空间分类。从中可以发现，西北电网整体单位发电用水量最低，中位数为  $1.65\text{m}^3/\text{MWh}$ ；其次是东北电网，中位数为  $1.75\text{m}^3/\text{MWh}$ ；蒙西电网和华东电网中位数同样低于全国水平；南方电网单位发电用水量最大，中位数为  $2.38\text{m}^3/\text{MWh}$ ，并且所有样本数值均高于全国中位数水平；华东电网和华北电网中位数与全国水平基本相当。环境温度和水资源稀缺性是造成地区差异的两个主要因素。环境温度越低，则冷却水吸热后与环境之间的温差越大，强化了传热过程，减少了冷却用水量。在水资源稀缺地区，不同用水部门之间的水资源竞争更加激烈，电厂面临更为严峻的水资源可得性制约，同时也受更高的用水成本激励，会在更大程度上采用高效节水技术、加强用水管理、减少用水量。上述两个因素的共同作用使循环冷却机组单位发电用水量的空间分布呈现北方低于南方、西部低于东部的特征。

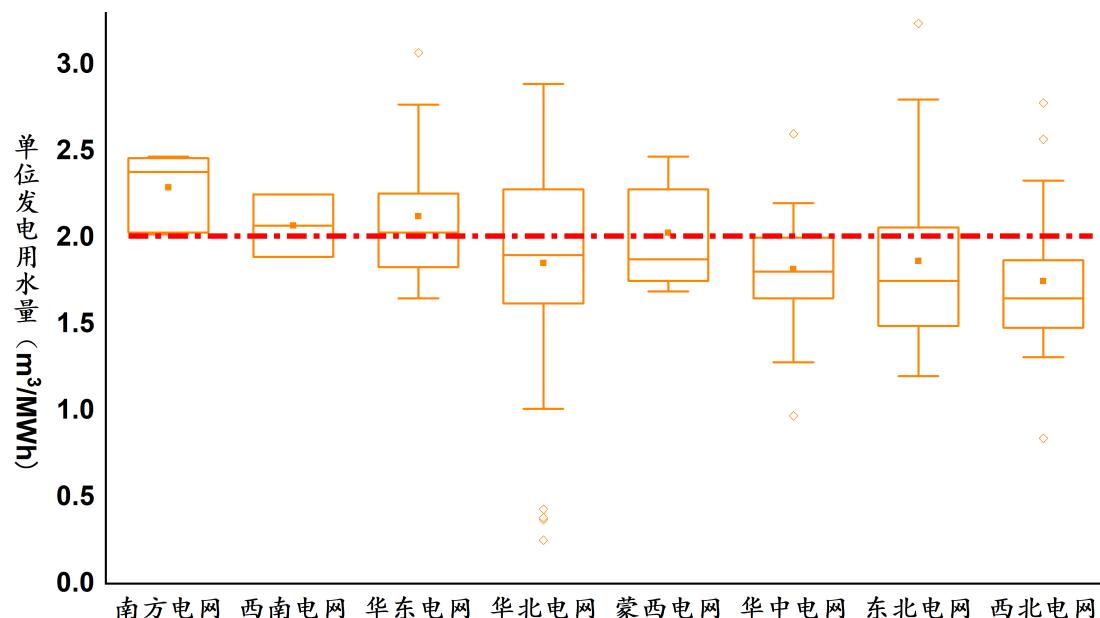


图 15. 2017 年 300MW 级循环冷却样本机组单位发电用水量空间分布

#### 4.2.4 空气冷却机组用水效率评价

空气冷却作为火电工业的关键节水技术，近年来在我国西北等干旱地区得到了广泛应用。与其他冷却类型的机组相比，空冷机组的用水效率最高。从图 16 中可看出，300MW 级空冷机组的单位发电用水量集中在  $0.39\text{-}0.45\text{m}^3/\text{MWh}$  之间，约 90% 的空冷机组用水率都满足 2012 年版国标定额，即  $0.63\text{m}^3/\text{MWh}$ 。满足新版用水定额通用值  $0.57\text{m}^3/\text{MWh}$ ，先进值  $0.30\text{m}^3/\text{MWh}$ ，领跑值  $0.23\text{m}^3/\text{MWh}$  的机组比重分别为 86%、17%、10%。

图 17 是关于 600MW 级空冷机组的用水效率描述性统计数据。满足原国家定额标准  $0.63\text{m}^3/\text{MWh}$  和新版定额中通用值标准  $0.49\text{m}^3/\text{MWh}$  的机组比重相同, 均约为 92%。29% 的机组满足新版定额中先进值标准  $0.27\text{m}^3/\text{MWh}$ , 21% 的机组满足领跑值标准  $0.22\text{m}^3/\text{MWh}$ 。

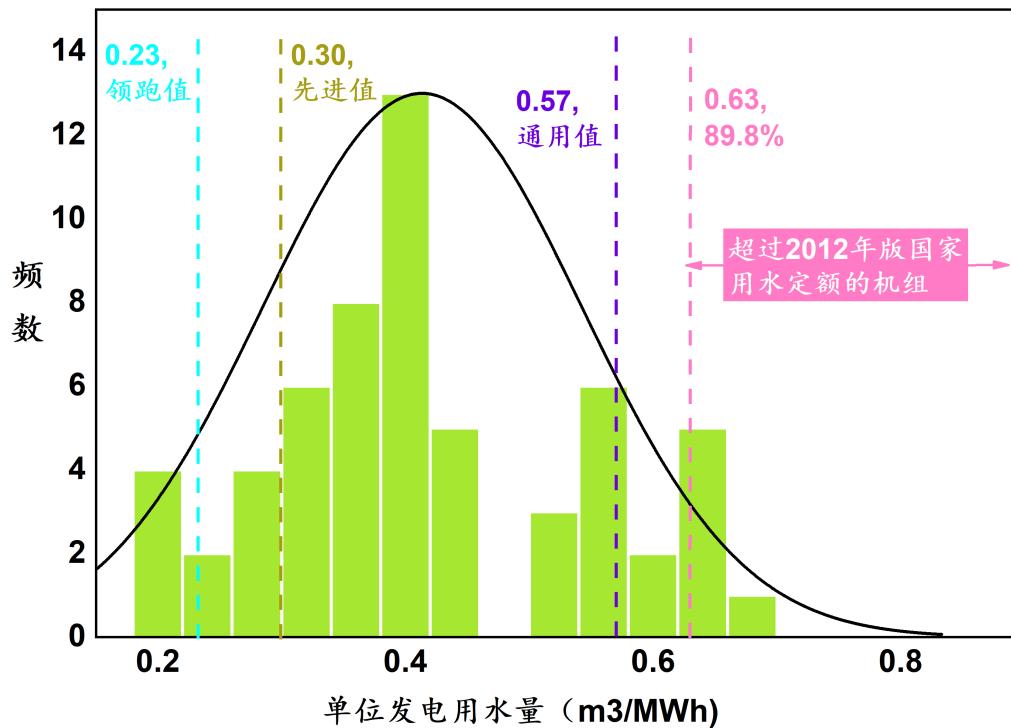


图 16. 2017 年 300MW 级空气冷却样本机组单位发电用水量频数分布

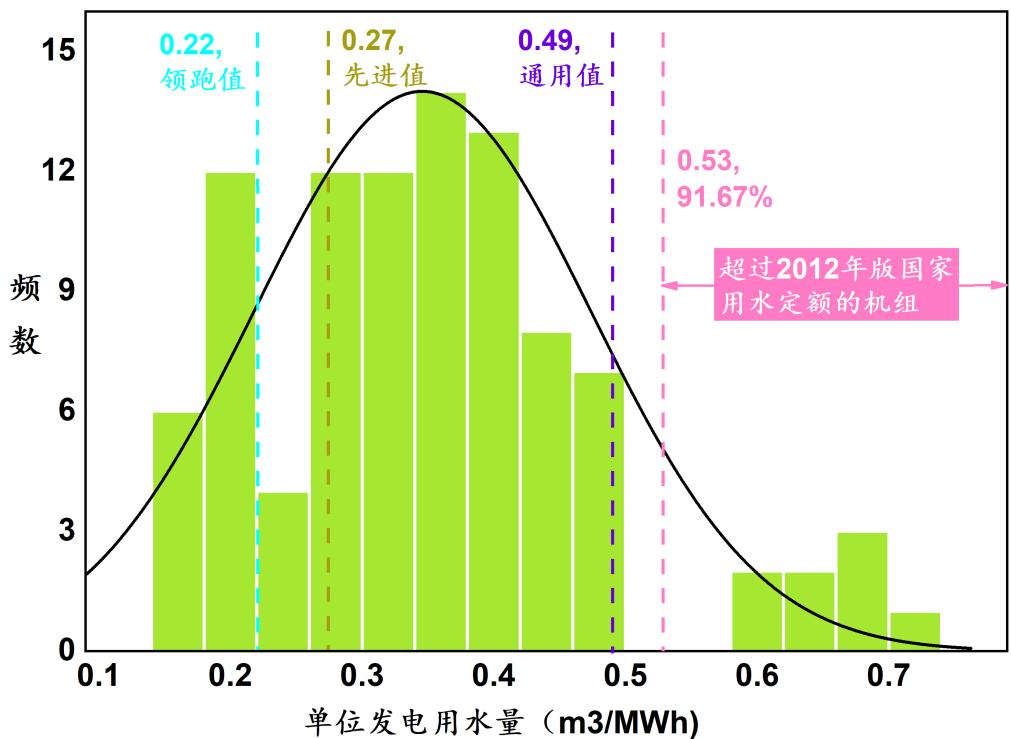


图 17. 2017 年 600MW 级空气冷却样本机组单位发电用水量频数分布

### 4.3 燃煤机组单位发电用水量多元回归分析

本节建立如公式 1 所示的多元回归模型，将各类机组用水量纳入一个统一的估算框架。基于上文描述性统计对用水量特点的认识，多元回归模型考虑了冷却技术类型、水源类型、装机容量、机组所属地区四个决定因素：

$$W_i = \sum_c \beta_c \cdot DCT_{c,i} + \left( \sum_c \theta_c \cdot DCT_{c,i} \right) \cdot DWT_{c,i} + \left( \sum_c \lambda_c \cdot DCT_{c,i} \right) \cdot \log CAP_i + \left( \sum_a \eta_a \cdot DCT_{c='rc',i} \right) \cdot Area_{a,i} + \varepsilon_i$$

(公式 1)

式中，下标  $i$  表示机组样本，下标  $c$  表示冷却技术类型，分为循环冷却 ( $c='rc'$ )，直流冷却 ( $c='ot'$ ) 和空气冷却 ( $c='air'$ )；下标  $a$  表示地域，分为华北区域 ( $a='HB'$ )，东北区域 ( $a='DB'$ )，华中区域 ( $a='HZ'$ )，西北区域 ( $a='XB'$ ) 和南方区域 ( $a='NF'$ )；

$W_i$  表示机组  $i$  的单位发电用水量，单位为  $\text{m}^3/\text{MWh}$ ；

$DCT_{c,i}$  是表示机组  $i$  使用的冷却技术  $c$  的二元变量，例如，当机组  $i$  使用循环冷却技术时，则  $DCT_{rc,i} = 1$ ， $DCT_{ot,i} = 0$ ， $DCT_{air,i} = 0$ ；

$DWT_{c,i}$  是表示机组  $i$  使用的水源类型的二元变量，当使用的水源类型为中水时，其值为 1，使用地表水、地下水等常规水源时其值为 0；

$CAP_i$  表示机组  $i$  的装机容量，单位为兆瓦 (MW)；

$Area_{a,i}$  表示机组  $i$  所在地区电网  $a$  的二元变量，例如，当机组  $i$  处于华北区域时，则

$Area_{HB,i} = 1$ ， $Area_{DB,i} = 0$ ， $Area_{HZ,i} = 0$ ， $Area_{XB,i} = 0$ ， $Area_{NF,i} = 0$ ，根据描述性统计的特征，我们仅分析地区差异对循环冷却机组的影响，直流冷却和空气冷却机组不考虑地区差异；

$\varepsilon_i$  是随机误差项；

$\beta_c$ ， $\theta_c$ ， $\lambda_c$ ， $\eta_a$  均为被估计参数。

在试算了自变量的若干组合后，我们发现如表 9 所示的模型拟合优度最高，最适合于预测各类机组的单位发电用水量。如下冗余或者回归结果不显著的参数从模型中剔除：

$\beta_{c='rc'}$ ，该参数对被解释变量的影响已经被循环冷却技术与机组所在地区的交互项所解释，使模型出现多重共线性，因此被剔除；

$\theta_{c='ot'}$ ，直流冷却机组均采用地表水为水源，因此被剔除；

$\theta_{c='air'}$ ，水源类型对空冷机组的影响在 95% 显著性水平上不显著，因此被剔除；

其余参数除  $\lambda_{c='air'}$  外均在 99% 显著性水平上显著,  $\lambda_{c='air'}$  在 95% 显著性水平上显著。 $\theta_{c='rc'}$  为正值, 说明其他条件相同情况下, 以中水为水源的循环冷却机组单位发电用水量高于采用常规水源的机组;  $\lambda_c$  均为负值说明机组装机容量越大, 单位发电用水量越小;  $\eta_a$  中代表南方电网的参数数值最大, 代表西北电网的参数数值最小, 说明不同地区的气候条件差异会对循环冷却机组的用水量产生影响。

表 9. 多元回归模型参数估计结果

未标准化系数			
参数	点估计	标准误	显著性
$\beta_{c='ot'}$	0.790	0.155	0.000
$\beta_{c='air'}$	1.041	0.327	0.001
$\theta_{c='rc'}$	0.147	0.024	0.000
$\lambda_{c='ot'}$	-0.210	0.031	0.000
$\lambda_{c='rc'}$	-0.079	0.025	0.002
$\lambda_{c='air'}$	-0.107	0.053	0.042
$\eta_{a='HB'}$	3.132	0.182	0.000
$\eta_{a='DB'}$	3.052	0.185	0.000
$\eta_{a='HD'}$	3.374	0.191	0.000
$\eta_{a='HZ'}$	3.092	0.189	0.000
$\eta_{a='XB'}$	2.931	0.183	0.000
$\eta_{a='NF'}$	3.411	0.195	0.000
样本数	1659		
F 值	2746		
$R^2$ (调整后)	0.956		

## 5.燃煤机组用水定额指标效果分析

### 5.1 估算数据和方法

本章基于 4.3 节的多元回归模型, 以 2020 年为基准年, 估算不同情景下落实新定额所获得的节水量。首先, 根据多元回归模型, 获得特定冷却技术类型、水源类型、装机容量和地区的机组单位发电用水量预测值及其概率密度函数。严格来说, 多元线性回归模型的预测值满足  $t$  分布, 当样本数量足够大时,  $t$  分布的概论密度函数形态非常接近正态分布。因此, 为简便起见, 我们假定用水强度满足正态分布。不同类型机组均值如表 10 所列。

表 10. 不同类型燃煤机组单位发电用水量均值

冷却方式	机组所在区域	装机容量	水源类型	均值
循环冷却	华北区域	300MW 级	常规水	1.93
			非常规水	2.08
		600MW 级	常规水	1.79
			非常规水	1.93
	东北区域	300MW 级	常规水	1.85
			非常规水	2.00
		600MW 级	常规水	1.71
			非常规水	1.85
	华东区域	300MW 级	常规水	2.17
	华东区域	600MW 级	常规水	2.03
直流冷却	华中区域	300MW 级	常规水	1.89
			非常规水	2.04
		600MW 级	常规水	1.75
			非常规水	1.89
	西北区域	300MW 级	常规水	1.73
			非常规水	1.88
		600MW 级	常规水	1.59
	南方区域	300MW 级	常规水	2.21
		600MW 级	常规水	2.07
空气冷却		300MW 级	常规水	0.34
		600MW 级	常规水	0.29
空气冷却		300MW 级	常规水	0.43
		600MW 级	常规水	0.35

我们建立了以 2020 年为基准的全国大中型燃煤发电机组清单，力求包含装机容量大于 300MW（含）的所有燃煤机组。2020 年清单以文献 Zhang et al.(2018)<sup>[19]</sup> 建立的 2015 年全国火电机组清单为起点，并收集了 2016-2018 年间所有新投产和新开工大中型燃煤机组信息，共计 265 台，其中 300MW 级 111 台，600MW 级 154 台。我们假定 2016-2018 年间开工但尚未投产的机组到 2020 年全部投产，由此获得完整的 2020 年燃煤机组清单。为估算发电量，我们进一步假定 2020 年各类机组利用小时数与 2017 年对标数据中同类机组平均利用小时数相同。2020 年分冷却技术类型、分装机容量、分地区、分水源类型燃煤机组装机容量和发电量估算结果如表 11 所示：

---

<sup>19</sup> Zhang, C., Zhong, L., Wang, J., Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. *Nature Energy*, 2018, 3: 792-799.

表 11. 2020 年燃煤机组装机容量和发电量估算

冷却形式	地区	装机容量	水源类型	2020 年各类	平均利用小时 (h)	2020 年各类型机组发电量 (TW · h)
				型机组装机容量 (GW)		
循环冷却	华北区域	300MW	常规水	20.95	4855.8	101.74
			非常规水	41.02		199.17
		600MW	常规水	24.84	4880.67	121.23
			非常规水	17.50		85.41
	东北区域	300MW	常规水	7.15	3866.28	27.66
			非常规水	15.82		61.15
		600MW	常规水	2.04	3824.64	7.81
			非常规水	16.36		62.57
	华东区域	300MW	常规水	25.02	4617.12	115.52
		600MW	常规水	45.16	4705.09	212.48
直流水冷却	华中区域	300MW	常规水	27.59	3924.71	108.29
			非常规水	4.42		17.36
		600MW	常规水	57.92	3803.01	220.29
			非常规水	26.64		101.29
	西北区域	300MW	常规水	13.59	4111.83	55.87
			非常规水	6.95		28.57
		600MW	常规水	1.20	4608.88	5.53
	南方区域	300MW	常规水	25.66	4209.13	108.01
		600MW	常规水	35.28	3418.6	120.6
空气冷却		300MW		68.64	4307.78	295.68
		600MW		178.88	4522.63	809.01
		300MW		82.80	4112.06	340.48
		600MW		121.94	4515.79	550.66

最后，我们根据水利部 2019 年 12 月发布的火力发电最新用水定额（详见表 6），设定了底线情景、理想情景和差异化情景三类计算情景，代表不同的节水管理水平和政策力度，具体情景设定方式和政策含义如表 12 所列。计算过程中，假定当前单位发电用水量没有达

到情景设定值的燃煤机组必须降低用水强度，全部实现达标，以此估计各情景下全国及各地的节水量。估算方法如公式 2、公式 3 所示。需要注意的是，本报告采用的估算方法只要求未达标部分必须达标，但并未考虑达标机组可能存在的进一步用水效率提升，因此计算结果反映的是相应情景下节水量的下限值，是一个保守估计，让我们理解不同政策执行力度下至少可以获得的节水效果。

表 12. 节水潜力计算情景设计

情景序号	参数设定方式	政策含义
<b>情景一：底线情景</b>	全国所有类型机组均达到通用值标准	政策推行力度弱，仅满足最低要求，代表定额标准执行后节水量的底线值。
<b>情景二：理想情景</b>	全国所有类型机组均达到先进值标准	定额标准发挥显著作用，大幅提升燃煤机组整体效率，估算结果代表节水量的理想值。
<b>情景三：差异化情景</b>	空冷机组以及位于西北、东北、华北地区的循环冷却机组达到领跑值标准；直流冷却机组和其余地区的循环冷却机组达到先进值标准	根据水资源稀缺性推行差异化政策，北方缺水地区机组达到最严格的领跑水平；南方丰水地区达到先进水平，执行力度与情景二相同。

节水潜力  $W_{c,k,a}$  通过以下等式计算：

$$W_{c,k,a} = EEP_{c,k,a} \cdot \int_{\gamma_{c,k,a,n}}^{\infty} f(x)_{c,k,a} \cdot (x - \gamma_{c,k,a,n}) dx \quad (公式 2)$$

$$f(x)_{c,k,a} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{c,k,a}} \cdot \exp \left[ -\frac{(x - \mu_{c,k,a})^2}{2\sigma_{c,k,a}^2} \right] \quad (公式 3)$$

式中， $W_{c,k,a}$  表示冷却方式 c、装机容量等级 k、地区 a（仅对循环冷却机组区分）机组的节水量估算结果；

$EEP_{c,k,a}$  表示冷却方式 c、装机容量等级 k、地区 a 机组的估算发电量；

$f(x)_{c,k,a}$  是代表特定机组类型单位发电用水量的概率密度函数，假定其呈正态分布，基于 4.3 节的多元回归模型获得；

$\gamma_{c,k,a,n}$  代表第 n 种情景下特定类型机组的用水定额值。

为了更好理解领跑值，先进值和通用值所处的用水水平，我们统计了不同标准下样本中超标机组的比例。如图 18 所示，约 80%-90% 的机组没有达到领跑值水平，占燃煤机组的绝大多数，也从侧面体现了领跑值是引领企业节水技术进步和用水效率提升的标杆。约 70% 左右的样本机组没有达到先进值，其中 600MW 级直流冷却机组未达标比例最低，为 54%，300MW 级空气冷却机组未达标比例最高，达到 83%。先进值是新建（改建、扩建）企业必须达到的标准，也应当作为多数现有机组节水改造的努力方向。通用值是定额设定的底线，目前 90% 以上的燃煤机组均能达到该标准，很大程度上体现了目前即使是技术水平相对落后的老旧机组也应该达到的用水效率水平。

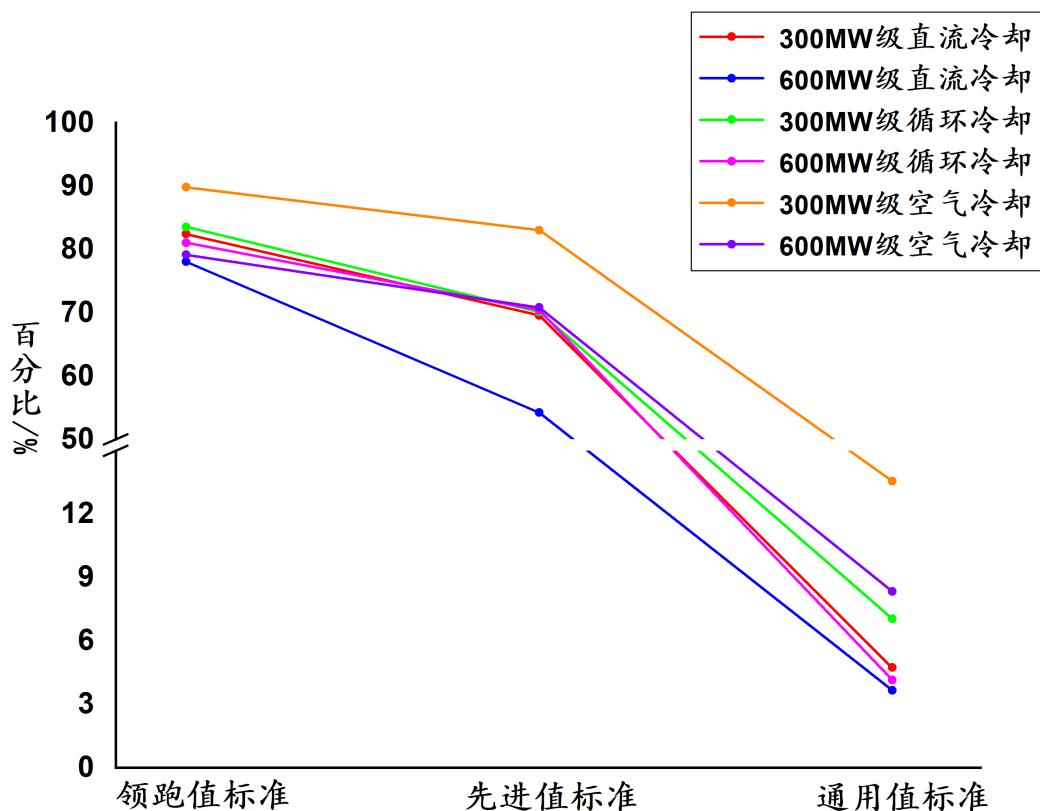


图 18. 不同标准下超标机组比例

## 5.2 节水总量计算结果

在三种不同的情景下，我们得到的 2020 年全国燃煤机组的节水量结果如图 19 所示。底线情景（情景一）下，我国燃煤机组年节水量仅 1.22 亿  $m^3$ 。其中，循环冷却、直流冷却、空气冷却机组的节水量分别占比 6.6%、51.6%、41.8%。该情景下循环冷却机组节水量占比相对较低的原因在于 94% 的循环冷却机组已经达到通用值标准，较弱的政策执行力度下，节水效果有限。

理想情景（情景二）下，2020年全国燃煤机组的节水量大幅增加至7.33亿m<sup>3</sup>，相当于2015年全国燃煤机组用水（取水）总量（不含贯流式冷却水）的13%，同时相当于2018年北京市工业用水（3.1亿m<sup>3</sup>）和农业用水（4.2亿m<sup>3</sup>）之和<sup>[20]</sup>，节水效果可观。其中，循环冷却、直流冷却、空气冷却机组的节水量分别占比58.3%、21.0%、20.9%。

差异化情景（情景三）下，2020年全国燃煤机组的节水量进一步增加到8.23亿m<sup>3</sup>，大约是底线情景节水量的6.7倍。其中，循环冷却、直流冷却、空气冷却机组的节水量分别占比58.6%、18.7%、22.8%。与理想情景相比，差异化情景对北方缺水地区实施更加严格的标准，增加的节水量来自北方循环冷却机组和空冷机组，其中空冷机组节水量比情景二增加23%，该情景下直流冷却机组的节水量没有变化。

可以发现，三个情景间节水量的差异主要取决于循环冷却机组，在理想情景和差异化情景下，循环冷却机组的节水量均达到了4亿m<sup>3</sup>以上，贡献了58%的总节水量。因此，我们针对循环冷却机组的节水效益进行了更细致的区域、水源类型的分解分析。如图20所示，使用常规水源的600MW级循环冷却机组的节水效果最为显著，为2.07亿m<sup>3</sup>，占循环冷却机组总节水量的42.9%。而采用非常规水的机组节水总量相对较小，仅占17.5%。这一方面是因为当前使用非常规水的机组数量较少，约占全部循环冷却机组的30%；另一方面，考虑到再生水水质通常劣于地表水或地下水，需要额外净化处理，新版用水定额规定当循环冷却机组采用再生水时，用水定额上调20%。

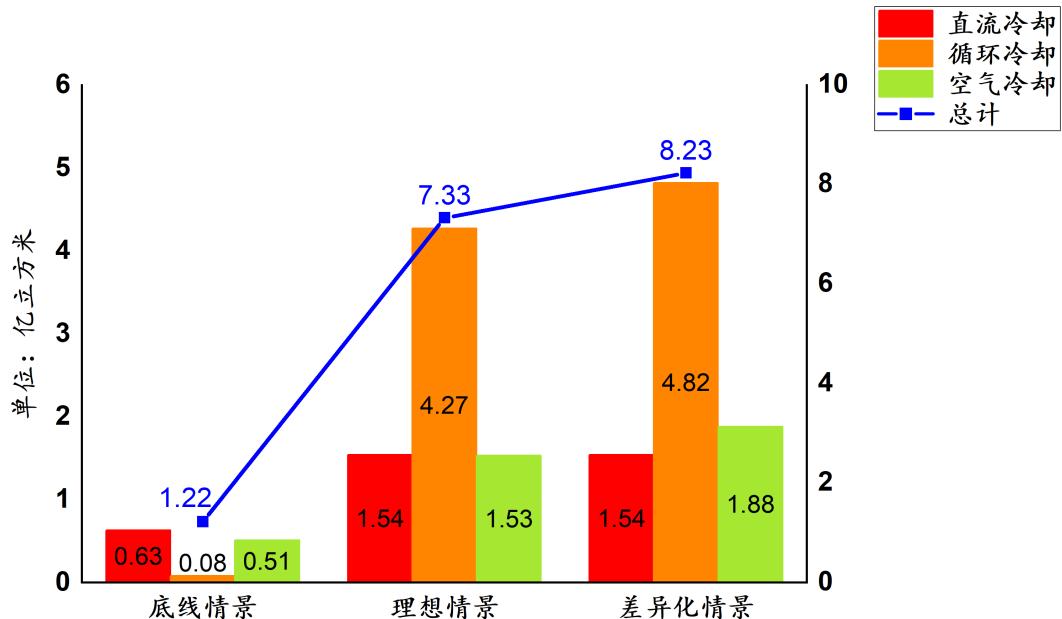


图 19. 2020 年不同情景下采用新标准的全国燃煤机组节水潜力

<sup>20</sup> 数据来源：北京市 2018 年国民经济和社会发展统计公报

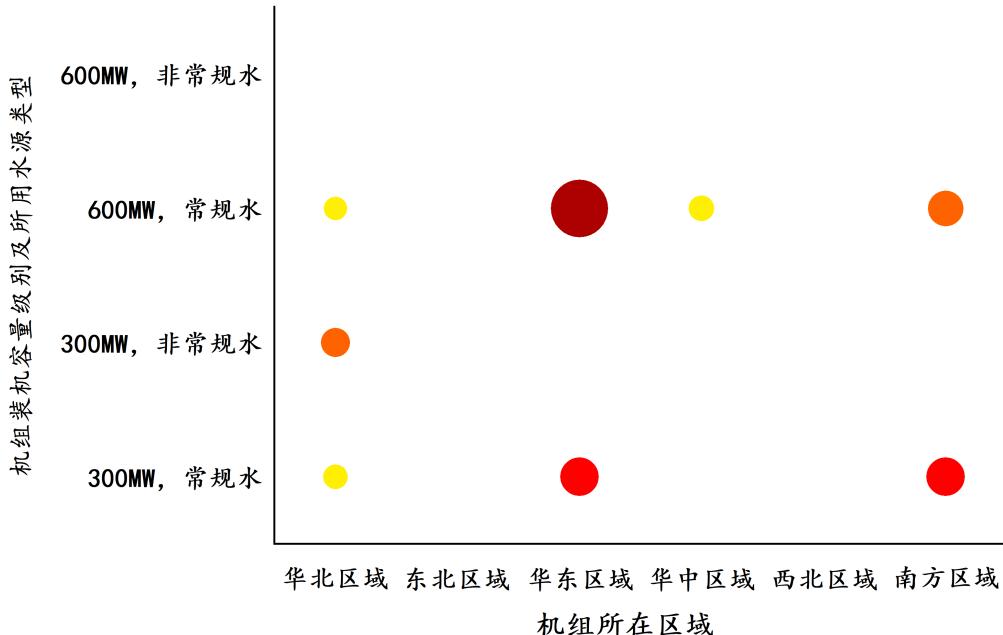


图 20. 差异化情景下区分装机容量、所用水源的各类循环冷却机组节水量

### 5.3 分区域计算结果

我们对差异化情景（情景三）的分区域计算结果进行更加详细的分析。结果发现，节水总量从大到小依次为华东区域（2.18 亿  $m^3$ ，占 26.5%）、华北区域（2.12 亿  $m^3$ ，占 25.8%）、南方区域（1.41 亿  $m^3$ ，占 17.1%）、西北区域（1.08 亿  $m^3$ ，占 13.1%）、华中区域（0.91 亿  $m^3$ ，占 11.1%）、东北区域（0.53 亿  $m^3$ ，占 6.4%）。发电总量差异、技术结构差异、以及地区差异是造成区域间提标政策节水效果差异的主要原因。华东和华北是现存燃煤发电装机容量最大的两个区域电网，且循环冷却机组发电量大，使之成为节水量最大的两个区域，合计超过全国总量的一半。由于国家煤炭和煤电发展布局西移<sup>[21]</sup>，东北地区煤电发展放缓，规模仅相当于华北区域的三分之一，加之寒冷的气候条件又使东北循环冷却机组用水强度显著低于其他地区，在上述因素的共同作用下，东北区域节水量最小。西北地区的节水量主要来自空冷机组，虽然西北地区近年来新建燃煤电厂数量最多，煤电工业发展最为迅速，但由于大量采用空冷技术，用水强度大幅降低，因此节水量绝对数量低于华东和华北地区。

<sup>21</sup> 《关于调控煤炭总量优化产业布局的指导意见》（国能煤炭[2014]454号）

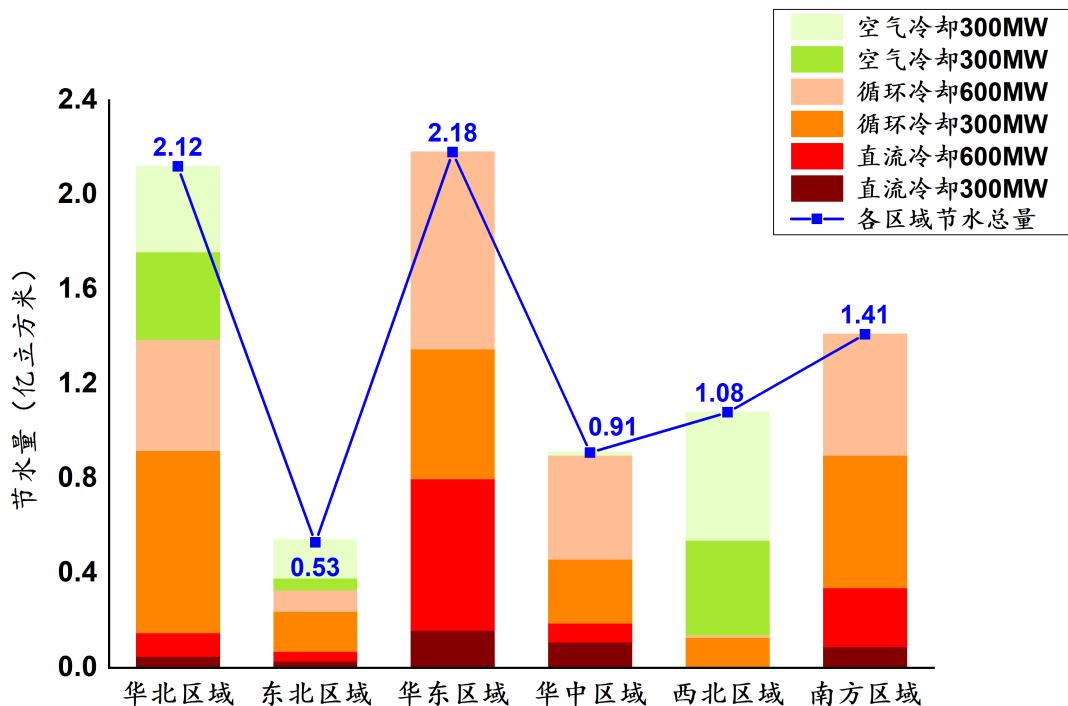


图 21. 差异化情景下各区域不同类型机组节水量

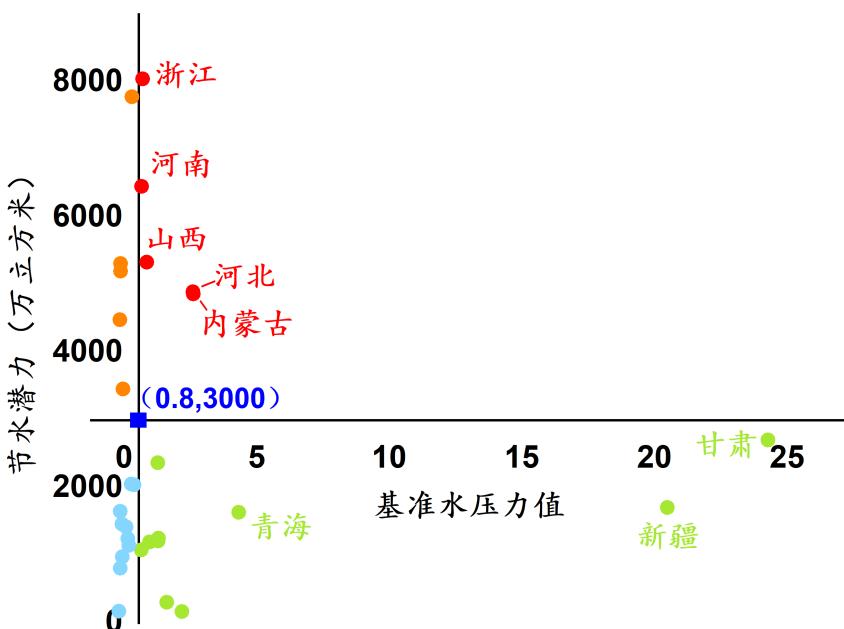


图 22. 差异化情景下分省区水压力、节水潜力象限图

最后，我们将节水量分解到省级行政区，同时结合各省燃煤电厂所在流域的加权平均基准水压力值进行分析。如图 22 所示，横轴以世界资源研究所（WRI）Aqueduct<sup>TM</sup> 全球基准水压力地图的中国更新数据为基础，以 2015 年电厂发电量为权重，计算了各省燃煤电厂所在汇水区的加权平均基准水压力值，反映了各地燃煤电厂实际面临的水资源压力水平。基准水压力为流域内每年取水量与长期平均可利用地表水资源量的比值，划分为五个等级：低

( $<0.1$ )、低到中(0.1-0.2)、中到高(0.2-0.4)、高(0.4-0.8)、极高( $>0.8$ )<sup>[22]</sup>。图中第一象限是处于极高水压力区域且节水潜力大的省份, 可见提标政策对于浙江、河南、河北、山西和内蒙古五个省份的效果最显著, 在未来可持续通过提高火力发电的用水标准, 以促进节水技术的推进来缓解当地严重的水压力。第四象限的省区属于水压力虽然很高, 但仅靠提标政策无法有效缓解当地水压力, 所以我们建议可采用其他节水措施, 比如退役小型燃煤机组实现机组大型化、强制使用非常规水, 实施用水总量控制政策等, 在这些政策的共同作用下, 新疆、甘肃、青海等省区的水压力可有所缓解。

---

<sup>22</sup> 《“水道”元数据文件: 水道全球地图 2.0》

## 6. 用水定额指标的节水量价值评估

本章评估指标政策节水效果的物理量所体现的水资源价值量。水资源的价值是经济价值、生态价值、社会价值相互作用下表现出来的一种状态。三类价值因素是相互统一、不可分割的。对于用水企业而言，水的货币化价值最直接地体现在节水行为所节省的水资源费（税）和减少的外购水成本，前者可以根据政府设定的水资源费（税）率计算，后者可以根据各地区平均工业供水价格计算。另一方面，水资源具有典型的公共物品属性，水资源开发利用对环境和社会均产生巨大的外部性影响，这些影响并没有完全体现在水资源的市场价格中。同时，水是一种最基本的生存必需品，获得清洁水的权利作为一种基本人权受到广泛认可，因此即便是水资源的市场价格也常常被人为低估，无法完全反映真实供需关系。

目前常用的水资源价值评估模型主要有：（1）影子价格模型，它的实质是使有限资源或产品在最优分配、合理利用条件下达到社会目标的边际贡献或边际收益的最大化，但其测算水资源价值时只反映了水资源的稀缺程度和水资源与总体经济效益之间的关系，不能代替水资源本身的价值<sup>[23]</sup>。（2）供求定价模型，它是借助用水需求的价格弹性系数，模拟水价变动对用水需求的影响，进而根据用水需求的控制目标来确定相应水价。此模型主要从资源的供求关系考虑其价值，但在非完全市场下得到的水价无法反映真实的水资源价值；同时，它的公式中只包含水量，忽略了水质对其价格的影响。（3）模糊综合评估模型。该模型可将影响水资源价值的各种因素全面的纳入水资源价值模型之中，综合评估水资源价值，并考虑了水资源的使用功能、经济承受能力等各种因素，在此基础上计算出水资源价格。

水资源价值作为一个复杂的综合概念，需要兼顾水的经济属性、生态属性和社会属性等多方面特征进行评价，为此我们尝试采用模糊综合评价模型测算节水量较大、水资源压力较高省份的节水效益价值量，并将模糊综合评价的计算结果与基于水资源费（税）和工业供水价格计算的直接经济成本进行比较，从不同层面理解定额指标的效益。

### 6.1 水资源价值模糊综合评估模型

水资源价值可以表述为一系列决定因素的函数：

$$WLJ = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (公式 4)$$

其中，WLJ 为水资源价值， $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  代表决定水资源价值的各类因素，如水资源稀缺程度、水环境质量、人口密度、社会经济发展水平等。

---

<sup>23</sup> 蒋剑勇.水资源价值模型综述[J].水利水电科技进展,2005(01):61-63+70.

在模糊综合评价中，首先定义若干隶属度等级，这里将所有指标划分为五个等级，即高、较高、一般、较低、低，确定各类评价指标的等级划分依据，作为隶属度函数计算的分界点。其次，定义各类因素在决定水资源价值中的权重，采用公式 5 计算评价对象的加权平均隶属度向量：

$$V = W^* \circ R \quad (公式 5)$$

其中， $V$  表示加权平均隶属度向量， $W^* = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  表示各因素在计算水资源价

值时的权重，满足  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ；“ $\circ$ ” 为模糊矩阵的复合运算符号，一般取算子“ $\wedge$ ”（取大）

或“ $\vee$ ”（取小），例如  $A = (a_{ik})_{m \times s}$ ,  $B = (b_{kj})_{s \times n}$ , 模糊矩阵  $A \circ B = (c_{ij})_{m \times n}$ , 其中

$c_{ij} = \max \left\{ (a_{ik} \wedge b_{kj}) \mid 1 \leq k \leq s \right\}$ ;  $R$  为以  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  各评价指标为基础构造的模糊评价矩阵，表示为：

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & R_{n3} & R_{n4} & R_{n5} \end{bmatrix} \quad (公式 6)$$

其中， $R_{ij}$  为评价指标  $i$  对等级  $j$  的隶属度取值。隶属函数通常定义为降（升）半梯形形态的一元线性函数。以逆向属性指标为例（即该指标数值越大，等级越低；反之等级越高），其函数形式为：

当  $j=1$  时，

$$R_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_{i1} (x \geq x_{i1}) \\ \frac{x_{i2} - x}{x_{i2} - x_{i1}} & x_{i1} < x < x_{i2} (x_{i2} < x < x_{i1}) \\ 0 & x \geq x_{i2} (x \leq x_{i2}) \end{cases} \quad (公式 7)$$

当  $j=2, 3, 4$  时，

$$R_{ij}(x) = \begin{cases} \frac{|x - x_{i,j-1}|}{|x_{ij} - x_{i,j-1}|} & x_{i,j-1} \leq x \leq x_{ij} (x_{i,j-1} \geq x \geq x_{ij}) \\ \frac{|x - x_{i,j+1}|}{|x_{i,j+1} - x_{i,j}|} & x_{ij} < x < x_{i,j+1} (x_{ij} > x > x_{i,j+1}) \\ 0 & x \leq x_{i,j-1}; x \geq x_{i,j+1} (x \geq x_{i,j-1}; x \leq x_{i,j+1}) \end{cases} \quad (公式8)$$

当j=5时，

$$R_{in}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_{in} (x \leq x_{in}) \\ \frac{|x - x_{i,n-1}|}{|x_{in} - x_{i,n-1}|} & x_{i,n-1} < x < x_{in} (x_{i,n-1} > x > x_{in}) \\ 0 & x \leq x_{i,n-1} (x \geq x_{i,n-1}) \end{cases} \quad (公式9)$$

上述方法计算的隶属度具有归一化特点，即对于给定的评价指标  $i$ ,  $R_{ij}$  满足：

$$\sum_{j=1} R_{ij} = 1, \text{ 且 } R_{ij} \in [0,1]。$$

上述模型得到的隶属度向量  $V$  是一个无量纲向量，为了将模糊综合评价的无量纲向量转换为相应的价值标量值，我们采用姜文来在《水资源价值论》中提出的如下转换公式<sup>[24]</sup>：

$$WLJ = V \cdot S^T \quad (公式10)$$

其中，WLJ 为水资源价格，这里的水资源价格是指水资源本身所具备的价格，根据水资源价值评估结果，结合经济主体的社会承担能力确定。V 为加权平均隶属度向量，S 为各等级的水资源价值换算向量。水资源价值换算向量采用社会承担能力的概念来确定，所谓社会承担能力，是指人们在某种信号的刺激下仍能保持常态的容忍力，它有一个上限，超过这个上限人们的心理和行为将会出现异常变化。为更明确、更直观的体现水资源价值换算中的社会承担能力，我们引入水费承受指数指标。水费承受指数表示水费支出占可支配收入的比重，通过人均水费支出除以人均可支配收入计算，其上限值是达到设定的最大水费承受指数时的水资源价格水平，由以下公式计算：

$$P = E \times A / C - D \quad (公式 11)$$

<sup>24</sup> 姜文来. 水资源价值论[M].北京：科学出版社，1998：156 - 159

其中,  $P$  为水资源价格上限;  $A$  为最大水费承受指数;  $E$  为月均居民人均可支配收入;  $C$  为月均居民生活用水量;  $D$  为供水成本及正常利润。则水资源价格在  $[P, 0]$  之间, 采用等差间隔的方法, 构造水资源价格向量:  $S = (P, 0.75P, 0.5P, 0.25P, 0)$ , 得到水资源价格  $P'$  为:

$$P' = V \cdot S^T \quad (公式12)$$

为了避免指标权重确定过程中的主观性, 本报告采用熵权法这一客观赋值方法确定权重向量  $W^*$ , 具体计算方法参见 [附录2](#)。

## 6.2 评价指标与数据来源

借鉴相关文献研究成果<sup>[25]</sup>, 我们选取具有代表性、独立性、可操作性的水资源稀缺性、水质、用水效率、社会经济发展水平 4 个方面的评价指标组成指标体系 (表 13)。指标评分标准根据样本的相关数据分布特征, 结合分位断点方法与指标意义综合确定。

表 13. 水资源评价指标体系

准则层	指标层	水资源价值核算指标评分标准				
		高	较高	一般	较低	低
水资源稀缺性	基准水压力	1	0.8	0.4	0.2	0.1
水质	地表水水质	≥II类	III类	IV类	V类	劣V类
用水效率	万元工业增加值 用水量 ( $m^3$ )	15	25	40	70	80
经济发展水平	人均GDP (美元)	15000	10000	7500	7000	6000

水资源稀缺性指标以各省燃煤机组所在汇水区的加权平均基准水压力 (BWS) 值表示。流域尺度的 BWS 数值来自于世界资源研究所 (WRI) Aqueduct<sup>TM</sup> 全球基线水压力地图。为了更加准确地反映燃煤机组所在流域的水资源压力, 以各流域燃煤机组装机容量为权重, 计算省级尺度的加权平均基准水压力值。水压力指标等级断点参照 Aqueduct<sup>TM</sup> 水压力级别设定, 水压力越大, 则水资源价值越高。

水质指标以由污染程度分类的地表水水质等级表示。水质等级标准参照《国家地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 分为 “≥II类”、“III类”、“IV类”、“V类”

<sup>25</sup> 朱永彬, 史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(05):1040-1050.

和“劣V类”。简富绩<sup>[26]</sup>，程万里<sup>[27]</sup>等人以监测点的污染因子（化学耗氧量，氨氮等）作为水质的评价指标，但不同水体的主要污染物不同且每一省区的监测点众多，不同监测点间的数据差异较大，难以有效反映一个省区的综合水环境质量。因此本文根据各省区省级地表水监测点位不同等级的水质类别比例确定相应隶属度，数据来源于2018年各省区的生态环境公报。

用水效率指标以万元工业增加值用水量表示。在《节水型社会建设评价指标体系(试行)》（水利部办资源[2005]179号印发）中万元工业增加值用水量定义为地区评价年工业每产生一万元增加值的用水量。它等于工业总用水量/工业增加值，是一个在工业领域反映某个国家或者地区的水资源利用效率和效益的强度相对指标。各省工业用水总量、工业增加值数据来源于国家统计局。万元工业增加值用水量越低代表用水效率越高，则水资源价值越高。

社会经济发展水平以人均GDP（美元）表示。各省人均GDP数据来源于国家统计局。人均GDP越高，则社会经济发展水平越高。一般而言，经济发展程度越高需水量越大。

水资源价格的核算以各省区2018年城乡居民人均可支配月收入（人均可支配年收入除以12）为标准。月均生活用水量按一月30天计算，以浙江省为例，人均生活用水量为204.36升/日，则每月用水量C为6.131吨。人均可支配年收入、月均生活用水量数据均来源于国家统计局。

根据世界银行等资料研究，水费支出占家庭收入的比例不同时，对居民心理的影响或其承受能力不同：水费占家庭收入的1%时，对人的心理影响不大；水费占家庭收入的2%时，人们开始关心用水量；水费占家庭收入的3%时，人们重视并注意节水；水费占家庭收入的5%以上时，对人的心理影响很大，人们开始认真节水并考虑水的重复利用<sup>[25]</sup>。多位学者<sup>[24-28, 29]</sup>认为中国城市居民生活用水支出占家庭收入的比例在3%以内为宜，并结合亚太经济和社会委员会（ESCAP）提出居民用水的水费支出应不超过家庭收入的3%<sup>[30]</sup>的建议，本文选取3%作为七个省区的最大水费承受指数。供水成本及利润选取省会城市的一，二阶梯综合水价<sup>[31]</sup>的平均值。

<sup>26</sup> 简富绩,宋晓谕,虞文宝.水资源资产价格模糊数学综合评价指标体系构建——以黑河中游张掖市为例[J].冰川冻土,2016,38(02):567-572.

<sup>27</sup> 程万里,李亦芳,郝伏勤,程银行.黄河三门峡河段基于模糊数学方法的水质评价[J].环境科学与管理,2007(10):188-190+132.

<sup>28</sup> 于兰.基于模糊理论的成都市水资源价值评判[J].水资源与水工程学报,2007(04):79-81.

<sup>29</sup> 钦丽娟,曹剑峰,平建华,姜纪沂,王楠,沈媛媛,李升.模糊数学在郑州市水资源价值评价中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2005(04):487-490+495.

<sup>30</sup> 李怀恩,庞敏,肖燕,史淑娟.基于水资源价值的陕西水源区生态补偿量研究[J].西北大学学报(自然科学版),2010,40(01):149-154.

<sup>31</sup> 综合水价=基本水价+污水处理费

选取节水潜力较大、水资源压力较大的七个省区计算节水的经济效益，即河北、山西、内蒙古、浙江、河南、甘肃和新疆，其模糊评价矩阵及隶属度向量计算结果参见附录3。最终得到基于模糊综合评价法的水资源货币化价值依次为：河北6.93元/m<sup>3</sup>、山西5.50元/m<sup>3</sup>、内蒙古11.04元/m<sup>3</sup>、浙江12.00元/m<sup>3</sup>、河南5.90元/m<sup>3</sup>、甘肃4.75元/m<sup>3</sup>、新疆5.07元/m<sup>3</sup>。

### 6.3 分省计算结果分析

节水经济效益等于货币化的水资源价值乘以节水总量。根据模糊评估法的测算，理想情景下（情景二）河北、山西、内蒙古、浙江、河南、甘肃和新疆七个省区燃煤机组用水定额指标政策带来的节水货币化效益分别为：3.37亿元、2.93亿元、5.41亿元、9.65亿元、3.81亿元、1.29亿元、0.86亿元。合计达到27亿元。

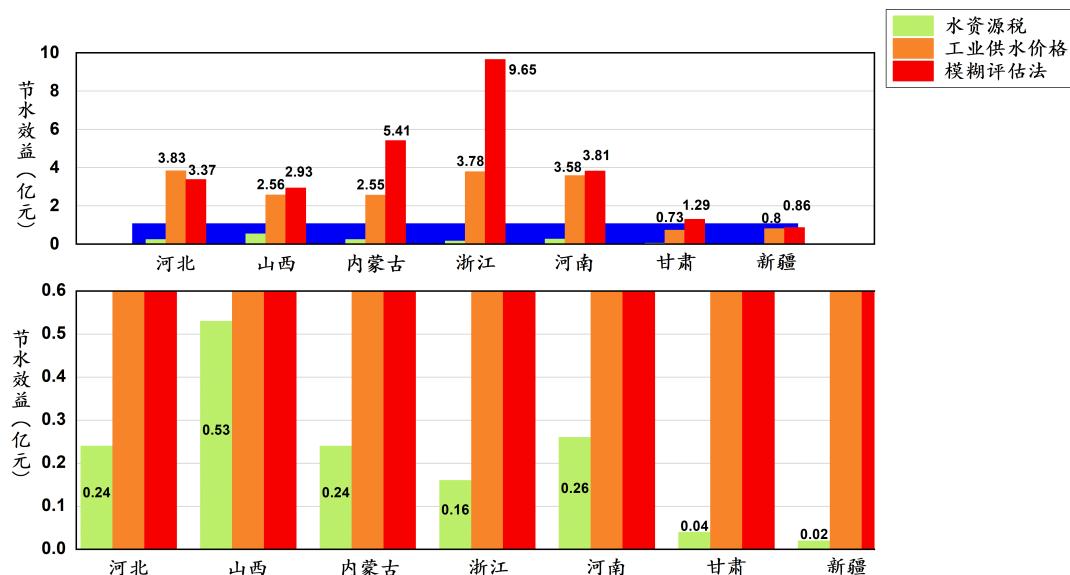


图 23. 三种货币化的水资源价值模式下的节水效益比较

同时我们将模糊综合评价的计算结果与基于水资源税和工业供水价格计算的直接经济成本进行比较，旨在从不同层面理解定额指标的效益。图23可见，根据水资源税计算的节水效益最低，河北、山西、内蒙古、浙江、河南、甘肃和新疆七地在水资源税模式下的节水效益仅为基于模糊评估法的7.2%、18.2%、4.5%、1.7%、6.8%、3.2%、2.2%，节水货币化效益总额仅为1.48亿元。浙江在三种价格模式下的货币化效益差异最大，运用模糊评估法测算的节水经济效益是水资源税费计算结果的60倍，是工业供水价格计算结果的2.6倍。山西、河南、新疆三地的模糊评估法测算的节水效益均略高于工业供水价格模式，分别超出14.6%、6.3%、8.1%。而内蒙古和浙江通过模糊评估法测算的节水效益超出工业供水价格模式的112.3%、155.3%，反映了两地当前的工业供水价格偏低，未能充分体现水资源的真实

价值，应当通过适当提高工业供水价格来激励节水技术应用、控制工业用水量增长，达到节约和保护水资源的目的。

## 7. 结论与建议

本报告分析了我国燃煤发电机组用水效率现状，针对 2020 年 2 月起实施的新版火力发电机组用水定额，评估了指标政策的节水效果及其货币化节水收益。我们首先回顾了我国燃煤火电工业国家和地方用水（取水）定额标准的修编历史和特点；其次，基于全国火电机组能效水平对标竞赛中报告的大中型燃煤机组单位发电用水量数据，评估我国燃煤发电机组用水效率，借助多元回归模型分析冷却技术、装机容量、所在区域和水源类型等因素对单位发电用水量的影响；最后，我们根据不同的政策落实力度设计了三类政策情景，分省区估算了用水定额指标的节水效果，并依据各地区水资源税费、工业用水价格、以及采用模糊综合评价方法测算的水资源价值，估算了节水量三个层面的经济价值。本报告的主要研究结论概述如下：

- 1) 用水（取水）定额是火电工业开展水资源管理工作、促进节水技术应用、提高水资源利用效率的重要政策依据。随着能源工业的迅猛发展，我国火电工业的技术结构和用水水平处于快速变化中。为适应技术变化和日益严格的水资源管理要求，我国大约每隔 10 年对燃煤火电用水（取水）定额进行一次修编，定额标准不断提高，指标分类日益细化。2020 年 2 月起实施的新版用水定额首次采用了领跑值、先进值和通用值三级指标，体现了分级管理的思路。除西藏外各省均出台了火电用水（取水）定额的地方标准，在过去 20 年间，大部分省区的地方标准更新了 2-3 次，黑龙江省更新了 4 次，北京、贵州和新疆仅出台过一次地方标准。国家标准出台后的 1-2 年内是地方标准更新的高峰期。绝大多数情况下，地方标准直接采用了国家标准的定额数值，地区差异性不强。贵州、上海、重庆、江苏等地存在个别定额指标比国家定额指标松的情况。华北和西北大型煤电基地是火电发展的热点区域，仅内蒙古的地方标准比国家标准更加严格，山西、陕西、甘肃、宁夏、新疆等地均直接沿用国家标准。
- 2) 全国火电机组能效水平对标覆盖了全国 50% 左右的 300MW 及以上机组，对标机组的区域和技术分布具有代表性。2013-2017 年间，全国 300MW 级循环冷却机组单位发电取水量中位数从  $1.99 \text{ m}^3/\text{MWh}$  下降至  $1.90 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ，600MW 级循环冷却机组中位数从  $1.94 \text{ m}^3/\text{MWh}$  下降至  $1.88 \text{ m}^3/\text{MWh}$ ；直流冷却机组变化相对较小；空冷机组用水强度有一定上升，300MW 级机组中位数从  $0.33 \text{ m}^3/\text{MWh}$  上升至  $0.39$

$\text{m}^3/\text{MWh}$ , 600MW 级机组中位数从  $0.31 \text{ m}^3/\text{MWh}$  上升至  $0.34 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 。与 2020 年新版用水定额比较, 95%以上的对标机组满足用水定额通用值, 30%左右的对标机组满足先进值, 约 10-20%的机组满足领跑值。受环境温度、缺水程度等因素影响, 循环冷却机组单位发电用水量存在显著的地区差异, 位于西北电网和东北电网的循环冷却机组单位发电用水量中位数较全国中位数低 12-18%, 南方电网循环冷却机组中位数高于全国中位数 20%。

- 3) 本研究假定对标机组单位发电用水量的分布能够代表全国所有同类型机组, 以 2020 年为目标年, 估算了当所有超标机组均达到特定定额标准时的节水量, 计算结果应视为特定政策情景下的保守估计。当所有类型机组均达到通用值标准时(底线情景), 年节水总量为 1.22 亿  $\text{m}^3$ ; 当所有类型机组均达到先进值标准时(理想情景)年节水量大幅增加至 7.33 亿  $\text{m}^3$ , 相当于全国燃煤火电用水总量的 13% (不含贯流式冷却水), 其中循环冷却、直流冷却、空冷机组分别贡献 58%、21%、21% 的节水量; 当进一步要求空冷机组以及西北、东北、华北地区的循环冷却机组达到领跑值时(差异化情景), 节水总量增加至 8.23 亿  $\text{m}^3$ , 增幅不大。从区域分布来看, 华东和华北地区由于装机总量大、循环冷却机组比重高, 节水量均超过 2 亿  $\text{m}^3$  占全国总量的四分之一左右; 西北地区节水量为 1.08 亿  $\text{m}^3$ ; 东北地区节水总量最小, 为 0.53 亿  $\text{m}^3$ 。
- 4) 针对 7 个节水潜力较大、水资源压力较大的省区, 采用模糊综合评估方法, 建立由水资源稀缺性、地表水水质、用水效率、经济发展水平四项指标构成的指标体系, 基于水费承受指数概念, 测算了节水量的货币化效益。浙江省单位水资源量的经济价值最高, 为 12 元/ $\text{m}^3$ ; 其次为内蒙古和河北, 分别为 11.04 元/ $\text{m}^3$ 、6.93 元/ $\text{m}^3$ ; 河南、山西、新疆、甘肃等地单位水资源价值在 4.5-6 元/ $\text{m}^3$  之间。据此估算, 理想情景下用水定额指标节水的货币化效益总额达 27 亿元, 依次为浙江 9.65 亿元、内蒙古 5.41 亿元、河南 3.81 亿元、河北 3.37 亿元、山西 2.93 亿元、甘肃 1.29 亿元和新疆 0.86 亿元。如采用各省实际工业用水价格测算, 节水经济效益总额为 17.8 亿元。如采用各省实际工业水资源税率测算, 则节水经济效益总额仅为 1.48 亿元。

基于本项目的研究结论，并结合研究过程中发现的一些的问题和对燃煤电厂水资源管理的思考，我们提出如下政策建议：

### 1. 统一燃煤机组水资源管理工作中使用的指标术语、核算方法和核算口径

经过多次修编，我国燃煤机组用水（取水）定额标准的质量取得了很大提升，更大程度地体现了分类管理和精细化管理的理念。但另一方面，在燃煤机组水资源管理的实际工作中，依然存在指标术语不一致、核算方法和核算口径不统一的问题，这给行政主管部门落实相关政策、企业依据标准开展节水工作带来了一定困难。例如，早期定额和地方标准中普遍采用“单位发电取水量”指标，新版定额采用“单位发电用水量”指标，而中国电力企业联合会组织开展的火电机组能效水平对标竞赛的数据采集中采用“单位发电耗水率”指标。又如，历次定额修编的用水（取水）核算口径均不涵盖直流冷却电厂的贯流式冷却水，而国家和各省编制的水资源公报所计算的用水量则涵盖火电贯流式冷却水，数量占工业用水总量的近一半。

指标术语名称不统一、核算口径不一致，使不同来源数据的可比性存疑，无论在学术研究还是政策落实中均容易引起歧义。因此，课题组建议以此次水节约（2019）373号文件的实施，以及后续配套国家标准的出台为契机，推进燃煤火电工业水资源管理工作的术语标准化，统一相关指标的核算方法和核算口径，并将之应用于管理政策制定、行业对标、企业用水监测和数据采集等各个环节。

### 2. 完善燃煤电厂用水监测体系，建立数据采集、分析和报告网络

数据驱动和数据赋能是当前资源环境管理领域的重要发展趋势。以用水定额为依据开展水资源管理工作，依赖于完善的用水数据监测和报告体系，而数据匮乏、数据可比性差、数据真实性难以保证往往成为制约政策实施效果的重要掣肘因素。

目前，在电厂用水数据监测和报告方面，美国的实践经验较为丰富，值得借鉴。美国能源部（DOE）和能源信息署（EIA）依据《联邦能源管理法案》负责采集全美发电机组年度运行数据，自1985年起纳入了发电机组用水数据，包括取水量、耗水量、废水排放量、夏季最高取水和排水温度等，这些信息同时也被美国地质调查局（USGS）用于编制全美用水统计分析，并向全社会公开。覆盖完整的数据采集体系和不断积累的数据基础使得针对美国电力工业水资源管理问题的学术研究成果最为丰富，这反过来又为管理实践提供了大量决策支撑信息。

我国通过电力行业的能效对标工作也已经建立了一套发电机组运行数据的采集网络，对火电工业节能发挥了重要推动作用。不过，由于能效对标工作由电力行业主导，其用水指标的设计和统计口径并未与水资源主管部门的管理需求充分对接，用水指标较为单一，覆盖面不全，且存在一定的数据质量控制问题。为了建立更加完善的燃煤电厂用水监测体系，首先需要加强电力工业主管部门和水资源主管部门的协同与互动，促进不同部门管理需求的对接与融合；其次，采用用水计量技术手段和信息化手段，扩大数据采集覆盖面，提高数据质量保障，加强数据资产积累的能力建设；最后，推动跨部门数据共享，建立多元主体共同参与的数据采集、分析和报告网络，促使政府管理、企业运营和学术研究形成良性循环，充分发挥信息公开和数据共享的外部性效益。

### 3. 根据不同地区的水资源禀赋和技术条件，制定差异化的地方标准

由于各地区水文、气象条件，以及火电工业的技术结构和用水水平存在显著差异，应当在统一的国家定额基础上，综合考虑水资源供需形势和电力工业发展趋势，因地制宜地制定地方标准。特别是西北、华北、以及部分沿海缺水地区，既是燃煤火电集聚区域，又面临日益严峻的缺水问题，应当及时更新标准，细化指标分类，适当采用更加严格的定额。本研究计算发现，水节约（2019）373号文件中新版定额标准中的通用值对推动现有燃煤电厂节水改造作用较弱。未达标电厂比重较低，并且集中在南方水资源丰富地区，而大部分北方电厂已经采取了应对缺水的适应性技术措施和管理措施，加之气候因素的影响，其水资源利用效率总体高于南方。因此，应鼓励北方现有电厂以新标准中的先进值为目标开展节水工作，以取得更加显著的节水效果。

### 4. 强制性措施与激励性措施相结合，提高企业节水改造积极性和主动性

在推动新版用水定额落实过程中，应兼顾强制性措施和激励性措施。强制性措施方面，定额指标可以融入电力行业管理的多个环节，获得政策落实的抓手，包括：在新建电厂取水许可审核与批复过程中，参照更加严格的用水定额提出节水技术要求；在既有电厂申请取水许可延续或变更时，对非常规水资源利用程度和用水效率提出更高的要求，并给予一定的技术改造过渡期；在制定老旧机组退役计划时，参照用水定额，将水资源利用效率作为参考因素之一，在其他条件相同的情况下，优先退役用水效率不达标或较低的机组。

除强制性措施以外，应适当采取激励性措施，提高企业节水改造的积极性和主动性，促使用水定额的效果从“底线情景”向“理想情景”提升。本研究的节水货币化经济价值测算结果显示，按现行水资源税率计算的节水经济效益不到按工业水价计算结果的十分之一。因

此，对于自备水源以及直接从自然水体取的火电企业而言，缴纳水资源税所起到的节水激励效果很弱，用水成本在发电总成本中的比重极低。基于水资源多重属性的模糊综合评估方法给出较高的水资源货币化价值，虽然这类货币化价值并非供用水过程中实际支付的价格，但可以作为衡量水资源影子价格的一种参考，说明节水的外部性收益远远高于企业获得的直接收益。这种情况下，政府部门可以设定用水效率目标，向既有电厂提供节水改造专项资金支持、设立技术改造示范工程，并进行效果考核和监测，而用水定额的“标杆值”能够为此类政策提供对标参考，特别是在北方缺水地区，有助于将外部性收益转化为企业内部经济激励。

## 关于作者

### 张 超

同济大学经济与管理学院 教授

联合国环境署-同济大学环境与可持续发展学院 兼职教授

电子邮件: chao\_zhang@tongji.edu.cn

电话: 021-65981707

通讯地址: 上海市杨浦区彰武路 1 号同济大厦 A 楼 1117 室

邮编: 200092

### 李佳雯

同济大学经济与管理学院 硕士研究生

## 致谢

在课题设计、立项和研究过程中, 我们得到了能源基金会有关同事的热情指导和帮助。感谢能源基金会总裁办公室主任钟丽锦、环境管理项目主任刘欣、环境管理项目主管尹乐对研究方案提出建议, 并对研究全过程给予帮助。感谢环境管理项目组成员姜一秀、周雪萌、盖怡君、徐薇认真细致的管理和协调工作。

在研究报告撰写过程中, 多位来自能源和水资源管理领域的专家学者提出了宝贵意见和建议, 我们表示衷心的感谢: 杨瑞广 (国家能源局发展规划司)、刘志强 (中国电力企业联合会资源节约处)、张晶杰 (中国电力企业联合会环保与应对气候变化处)、白雪 (中国标准化研究院)、蒋云钟 (中国水利水电科学研究院)、李维明 (国务院发展研究中心资源与环境政策研究所)、赵钟楠 (水利部水利水电规划设计总院)、田磊 (国家发展和改革委员会能源研究所)、付晓天 (世界资源研究所)、罗天一 (世界资源研究所)、周元春 (南京财经大学经济学院)、廖夏伟 (北京大学环境与能源学院)。

## 附录 1：三类燃煤火电机组冷却技术特点

直流冷却又称开式冷却，基本原理如图 24 所示，直流冷却系统从江、河、湖、海等天然水体中抽取大量原水作为冷却水，冷却水经冷凝器与乏汽换热升温后仍然排回水源。直流冷却方式利用冷却水升温的显热带走废热，单位发电量的冷却水取水量主要取决于机组热效率以及原水和温排水之间的温差。大中型机组的取水强度约为  $80\text{--}120\text{m}^3/\text{MW}\cdot\text{h}$ ，具有较为明显季节性差异，冬季原水温度低，排水温差大，取水量较小，夏季如果原水温度过高会对电厂运行产生不利影响。直流冷却电厂的耗水量来自除凝汽器冷却之外的其他工艺环节，通常不超过  $1\text{m}^3/\text{MW}\cdot\text{h}$ 。大量取水改变河流和湖泊的局部流态、温排水造成水体热污染是直流冷却电厂的主要水环境影响。为避免排水温度过高对水生态环境造成破坏，欧美国家对直流冷却电厂排水制定了严格的限制，例如，欧盟环境法规规定直流冷却水升温不超过  $10^\circ\text{C}$ ，且温排水与径流混合后的水温不得超过  $28^\circ\text{C}$ <sup>[32]</sup>。我国虽然在新建电厂的环境影响评价中需要分析热污染的影响范围，但目前火电水污染排放标准中尚未未对排水温度做出明确规定。

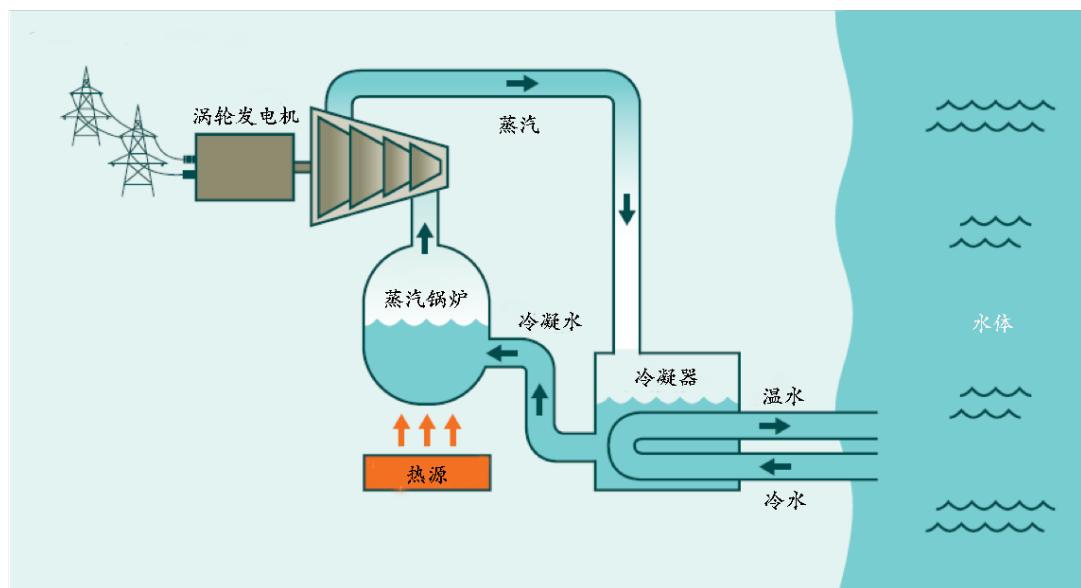


图 24. 直流冷却示意图<sup>[33]</sup>

循环冷却又称闭式冷却，基本原理如图 25 所示。冷却塔（或冷却箱）是循环冷却的主要设备，冷却水在凝汽器中吸热后被泵送至冷却塔，在风扇的辅助作用下与空气对流降温，降温后的冷却水再次泵送至冷凝器换热，形成循环。降温过程中，一部分冷却水直接从冷却塔蒸发，通过气化潜热带走废热，为了弥补蒸发和吹散损失，需要不断补充冷却水，维持水量平衡。另一方面，蒸发导致循环水中盐离子不断积累，为了将盐离子浓度维持在适度水平，

<sup>32</sup> Behrens, P., van Vliet, M.T.H., Nanninga, T., Walsh, B., Rodrigues, J.F.D. Climate change and the vulnerability of electricity generation to water stress in the European Union. *Nature Energy* 2017, 2: 17114.

<sup>33</sup> 图片来源：Water in the energy industry:an introduction.BP International Ltd.2013.  
[www.bp.com/energysustainabilitychallenge](http://www.bp.com/energysustainabilitychallenge)

同时需要排出一部分浓盐水。排水量的大小由循环浓缩倍率<sup>[34]</sup>决定，浓缩倍率越高，排水量越小，补水量也相应降低。循环冷却系统补水是循环冷却电厂取水量最大的环节，通常占全厂取水总量的80%以上。与直流冷却相比，循环冷却电厂的取水量大幅降低至 $2\text{m}^3/\text{MW}\cdot\text{h}$ 左右，大部分取水通过冷却塔蒸发，其耗水量接近取水量。

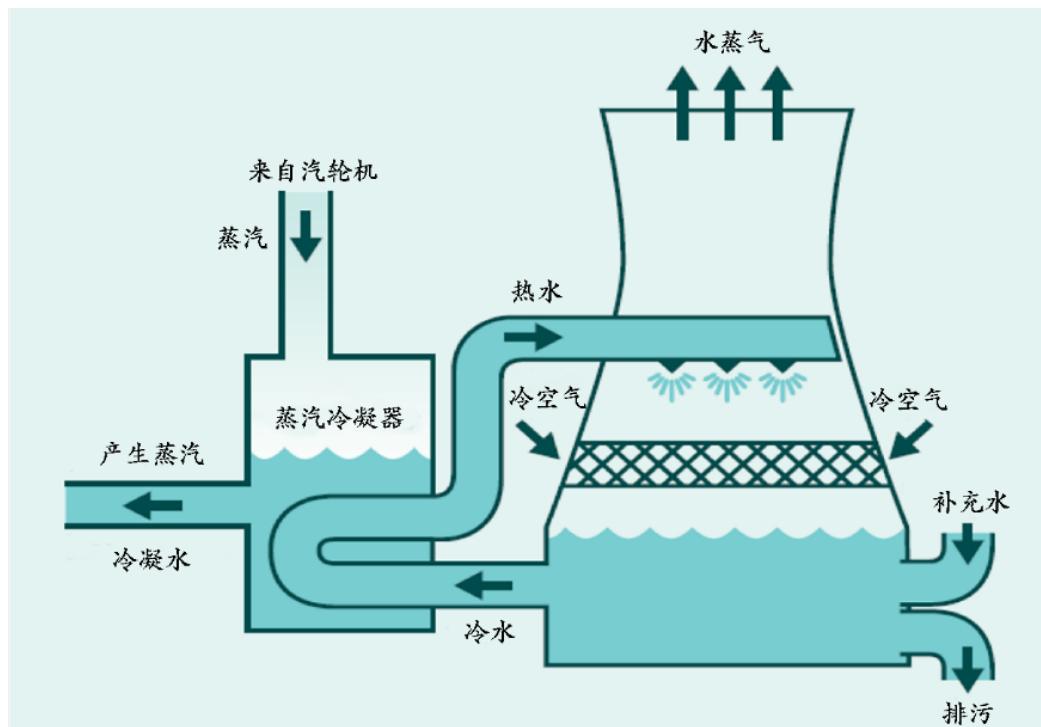


图 25. 循环冷却示意图<sup>[35]</sup>

空气冷却以空气作为传热介质带走废热，基本原理如图26所示。空气冷却分为直接空冷与间接空冷两大类型。直接空冷技术利用机械通风使空气在空冷岛上与乏汽换热，排出热空气带走废热。间接空冷技术以密闭的循环水作为中间换热介质，循环水首先通过表面式凝汽器与乏汽换热，然后进入空冷塔与空气换热，热空气从冷却塔排出，冷却后的循环水再次返回凝汽器。间接空冷的循环水必须使用除盐水，整个过程中没有循环水蒸发和排污损失。与传统的循环冷却相比，两类空冷技术均省去了冷却系统的取水和耗水，可使单位发电取水量降低约80%。空冷机组的投资和运行成本均高于水冷机组。空冷机组通常在更高的汽轮机背压下运行，尤其是直接空冷，导致整体热效率降低，单位供电煤耗大约比同类型水冷机组高15-20千克标准煤/ $\text{MW}\cdot\text{h}$ <sup>[36]</sup>。

<sup>34</sup> 循环浓缩倍率指排水盐离子浓度与原水盐离子浓度的比值。

<sup>35</sup> 图片来源：Water in the energy industry:an introduction.BP International Ltd.2013.  
[www.bp.com/energysustainabilitychallenge](http://www.bp.com/energysustainabilitychallenge)

<sup>36</sup> Zhang, C., Anadon, L.D., Mo, H., Zhao, Z., Zhu, L. The water-carbon trade-off in China's coal power industry. Environmental Science & Technology. 2014, 48: 11082-11089.

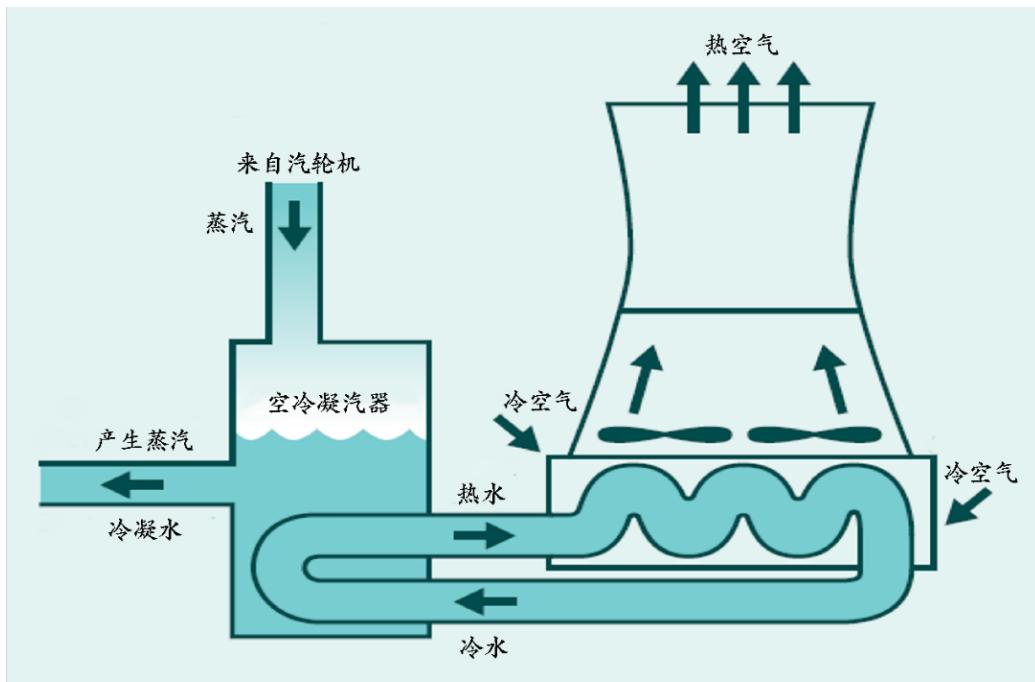


图 26. 空气冷却（间接空冷）示意图<sup>[37]</sup>

<sup>37</sup> 图片来源: Water in the energy industry:an introduction.BP International Ltd.2013.  
[www.bp.com/energysustainabilitychallenge](http://www.bp.com/energysustainabilitychallenge)

## 附录 2：基于熵值法的权重确定方式

在信息论中, 熵值反映了信息的无序化程度, 可以用来度量信息量的大小。某项指标携带的信息越多, 表示该指标对决策的作用就越大。熵值越小, 则系统的无序度越小, 故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用, 即由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标的权重, 从而尽量消除各指标权重的人为干扰, 使评价结果更符合客观实际。其计算步骤如下

[38] :

(1) 构建m个评价对象、n个评价指标的判断矩阵Q

$$Q = (q_{ij})_{m \times n} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (\text{公式13})$$

(2) 将判断矩阵Q进行归一化处理, 得到归一化矩阵B', B'的元素为

$$b_{ij} = \frac{q_{ij} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \quad (\text{公式14})$$

式中,  $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$  分别为同一评价指标下不同对象中最满意者、最不满意者。

(3) 根据熵的定义, 确定评价指标的熵值。

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (\text{公式15})$$

$$f_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; \quad 0 \leq H_i \leq 1$$

式中:  $f_{ij}$  为修正后的评价指标值,  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。当  $f_{ij}=0$  时  $\ln f_{ij}$  无意义, 因此需要对  $f_{ij}$  加以修正, 将其定义为:

$$f_{ij} = \frac{1+b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1+b_{ij})} \quad (\text{公式16})$$

(4) 利用熵值计算评价指标的熵权。

$$\omega_i^* = \frac{1-H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (\text{公式17})$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i^* = 1$$

<sup>38</sup> 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008(09): 1092-1097+1104.

### 附录 3：七省区水资源模糊评价矩阵及隶属度向量计算结果

计算得到河北 ( $R_{HB}$ )、山西 ( $R_{SX}$ )、内蒙古( $R_{NM}$ )、浙江 ( $R_{ZJ}$ )、河南 ( $R_{HN}$ )、甘肃 ( $R_{GS}$ ) 、新疆( $R_{XJ}$ )七个省区的水资源模糊评价矩阵分别为：

$$R_{HB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.031 & 0.969 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.438 & 0.562 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{SX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.971 & 0.029 \\ 0.07 & 0.93 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.85 & 0.15 \end{bmatrix}$$

$$R_{NM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.257 & 0.743 \\ 0 & 0.593 & 0.407 & 0 & 0 \\ 0.064 & 0.936 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{ZJ} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.24 & 0.76 & 0 & 0 & 0 \\ 0.981 & 0.019 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{HN} = \begin{bmatrix} 0.55 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.847 & 0.153 & 0 & 0 \\ 0 & 0.031 & 0.969 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{GS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.593 & 0.407 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{XJ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.087 & 0.913 & 0 & 0 \\ 0 & 0.027 & 0.973 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用熵值法计算可得各评价指标的权重  $W^* = (0.3861, 0.2602, 0.1625, 0.1913)$ ，

由此计算各省加权平均隶属度向量为：

$$V_{HB} = W^* \circ R_{HB} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0 & 0.1913 & 0.2602 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.461 \ 0 \ 0.228 \ 0.311 \ 0);$$

$$V_{SX} = W^* \circ R_{SX} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0.1625 & 0 & 0.2602 & 0.15 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.403 \ 0.169 \ 0 \ 0.271 \ 0.156);$$

$$V_{NM} = W^* \circ R_{NM} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0.1913 & 0.1625 & 0.257 & 0.2602 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.307 \ 0.152 \ 0.129 \ 0.204 \ 0.207);$$

$$V_{ZJ} = W^* \circ R_{ZJ} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0.3 & 0.2602 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.408 \ 0.317 \ 0.275 \ 0 \ 0);$$

$$V_{HN} = W^* \circ R_{HN} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0.3861 & 0.2602 & 0.2602 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.299 \ 0.299 \ 0.201 \ 0.201 \ 0);$$

$$V_{GS} = W^* \circ R_{GS} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0 & 0.1625 & 0.1625 & 0.1913 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.428 \ 0 \ 0.180 \ 0.180 \ 0.212);$$

$$V_{XJ} = W^* \circ R_{XJ} = \begin{pmatrix} 0.3861 & 0.087 & 0.1913 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 归一化结果为}$$

$$(0.581 \ 0.131 \ 0.288 \ 0 \ 0)。$$

最终得到七个省区根据模糊综合评价法测算出的水资源货币化价值如下：

$$\text{河北: } WLJ_{HB} = V_{HB} \cdot S_{HB}^T = 6.93 \text{ (元/m}^3\text{)}$$

山西:  $WLJ_{SX} = V_{SX} \cdot S_{SX}^T = 5.50$  (元/m<sup>3</sup>)

内蒙古:  $WLJ_{NM} = V_{NM} \cdot S_{NM}^T = 11.04$  (元/m<sup>3</sup>)

浙江:  $WLJ_{ZJ} = V_{ZJ} \cdot S_{ZJ}^T = 12.00$  (元/m<sup>3</sup>)

河南:  $WLJ_{HN} = V_{HN} \cdot S_{HN}^T = 5.90$  (元/m<sup>3</sup>)

甘肃:  $WLJ_{GS} = V_{GS} \cdot S_{GS}^T = 4.75$  (元/m<sup>3</sup>)

新疆:  $WLJ_{XJ} = V_{XJ} \cdot S_{XJ}^T = 5.07$  (元/m<sup>3</sup>)